



# Modelisation et aide a la decision pour l'introduction de technologies communicantes en milieu hospitalier.

Sylvain Housseman

## ► To cite this version:

Sylvain Housseman. Modelisation et aide a la decision pour l'introduction de technologies communicantes en milieu hospitalier.. Autre. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2011. Français. NNT : 2011EMSE0606 . tel-00676621

**HAL Id: tel-00676621**

**<https://theses.hal.science/tel-00676621>**

Submitted on 5 Mar 2012

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



N° d'ordre : **2011 EMSE 0606**

## **THÈSE**

proposée par

**SYLVAIN HOUSSEMAN**

pour obtenir le grade de  
Docteur de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne

Spécialité : **Génie Industriel**

*MODELISATION ET AIDE A LA DECISION POUR L'INTRODUCTION DE  
TECHNOLOGIES COMMUNICANTES EN MILIEU HOSPITALIER*

Soutenue à Gardanne, le 15 Avril 2011

### **Membres du jury**

Président	Michel GOURGAND	Professeur, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand
Rapporteurs	Jean-Charles BILLAUT Evren SAHIN	Professeur, Université François-Rabelais, Tours Maître de Conférences, École Centrale Paris, Paris
Examineur	Rémy COLLOMP	Pharmacien Gérant, Hôpital Archet 2, Nice
Directeurs de thèse	Dominique FEILLET Xiaolan XIE	Professeur, ENSM-SE, Gardanne Professeur, ENSM-SE, Saint-Etienne
Co-Encadrant	Nabil ABSI	Chargé de Recherche, ENSM-SE, Gardanne

**Spécialités doctorales :**

SCIENCES ET GENIE DES MATERIAUX  
 MECANIQUE ET INGENIERIE  
 GENIE DES PROCEDES  
 SCIENCES DE LA TERRE  
 SCIENCES ET GENIE DE L'ENVIRONNEMENT  
 MATHEMATIQUES APPLIQUEES  
 INFORMATIQUE  
 IMAGE, VISION, SIGNAL  
 GENIE INDUSTRIEL  
 MICROELECTRONIQUE

**Responsables :**

J. DRIVER Directeur de recherche – Centre SMS  
 A. VAUTRIN Professeur – Centre SMS  
 G. THOMAS Professeur – Centre SPIN  
 B. GUY Maître de recherche – Centre SPIN  
 J. BOURGOIS Professeur – Centre SITE  
 E. TOUBOUL Ingénieur – Centre G2I  
 O. BOISSIER Professeur – Centre G2I  
 JC. PINOLI Professeur – Centre CIS  
 P. BURLAT Professeur – Centre G2I  
 Ph. COLLOT Professeur – Centre CMP

**Enseignants-chercheurs et chercheurs autorisés à diriger des thèses de doctorat (titulaires d'un doctorat d'État ou d'une HDR)**

AVRIL	Stéphane	MA	Mécanique & Ingénierie	CIS
BATTON-HUBERT	Mireille	MA	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
BENABEN	Patrick	PR 1	Sciences & Génie des Matériaux	CMP
BERNACHE-ASSOLLANT	Didier	PR 0	Génie des Procédés	CIS
BIGOT	Jean-Pierre	MR	Génie des Procédés	SPIN
BILAL	Essaïd	DR	Sciences de la Terre	SPIN
BOISSIER	Olivier	PR 1	Informatique	G2I
BORBELY	Andras	MR	Sciences et Génie des Matériaux	SMS
BOUCHER	Xavier	MA	Génie Industriel	G2I
BOUDAREL	Marie-Reine	PR 2	Génie Industriel	DF
BOURGOIS	Jacques	PR 0	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
BRODHAG	Christian	DR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
BURLAT	Patrick	PR 2	Génie industriel	G2I
COLLOT	Philippe	PR 1	Microélectronique	CMP
COURNIL	Michel	PR 0	Génie des Procédés	SPIN
DAUZERE-PERES	Stéphane	PR 1	Génie industriel	CMP
DARRIEULAT	Michel	IGM	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
DECHOMETS	Roland	PR 1	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
DESRAYAUD	Christophe	MA	Mécanique & Ingénierie	SMS
DELAFOSSÉ	David	PR 1	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
DOLGUI	Alexandre	PR 1	Génie Industriel	G2I
DRAPIER	Sylvain	PR 2	Mécanique & Ingénierie	SMS
DRIVER	Julian	DR 0	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
FEILLET	Dominique	PR 2	Génie Industriel	CMP
FOREST	Bernard	PR 1	Sciences & Génie des Matériaux	CIS
FORMISYN	Pascal	PR 1	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
FRACZKIEWICZ	Anna	DR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
GARCIA	Daniel	MR	Génie des Procédés	SPIN
GIRARDOT	Jean-Jacques	MR	Informatique	G2I
GOEURLOT	Dominique	MR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
GRAILLOT	Didier	DR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
GROSSEAU	Philippe	MR	Génie des Procédés	SPIN
GRUY	Frédéric	MR	Génie des Procédés	SPIN
GUY	Bernard	MR	Sciences de la Terre	SPIN
GUYONNET	René	DR	Génie des Procédés	SPIN
HERRI	Jean-Michel	PR 2	Génie des Procédés	SPIN
INAL	Karim	PR 2	Microélectronique	CMP
KLÖCKER	Helmut	DR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
LAFORÉST	Valérie	CR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
LERICHE	Rodolphe	CR CNRS	Mécanique et Ingénierie	SMS
LI	Jean-Michel	EC (CCI MP)	Microélectronique	CMP
LONDICHE	Henry	MR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
MALLIARAS	George Grégory	PR 1	Microélectronique	CMP
MOLIMARD	Jérôme	MA	Mécanique et Ingénierie	SMS
MONTHEILLET	Frank	DR 1 CNRS	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
PERIER-CAMBY	Laurent	PR 2	Génie des Procédés	SPIN
PIJOLAT	Christophe	PR 1	Génie des Procédés	SPIN
PIJOLAT	Michèle	PR 1	Génie des Procédés	SPIN
PINOLI	Jean-Charles	PR 0	Image, Vision, Signal	CIS
STOLARZ	Jacques	CR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
SZAFICKI	Konrad	MR	Sciences & Génie de l'Environnement	SITE
THOMAS	Gérard	PR 0	Génie des Procédés	SPIN
TRIA	Assia		Microélectronique	CMP
VALDIVIESO	François	MA	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
VAUTRIN	Alain	PR 0	Mécanique & Ingénierie	SMS
VIRICELLE	Jean-Paul	MR	Génie des procédés	SPIN
WOLSKI	Krzysztof	DR	Sciences & Génie des Matériaux	SMS
XIE	Xiaolan	PR 1	Génie industriel	CIS

**Glossaire :**

PR 0 Professeur classe exceptionnelle  
 PR 1 Professeur 1<sup>ère</sup> classe  
 PR 2 Professeur 2<sup>ème</sup> classe  
 MA(MDC) Maître assistant  
 DR Directeur de recherche  
 Ing. Ingénieur  
 MR(DR2) Maître de recherche  
 CR Chargé de recherche  
 EC Enseignant-chercheur  
 IGM Ingénieur général des mines

Dernière mise à jour le : 13 septembre 2010

**Centres :**

SMS Sciences des Matériaux et des Structures  
 SPIN Sciences des Processus Industriels et Naturels  
 SITE Sciences Information et Technologies pour l'Environnement  
 G2I Génie Industriel et Informatique  
 CMP Centre de Microélectronique de Provence  
 CIS Centre Ingénierie et Santé





# Remerciements

Tout d'abord, un grand Merci à Stéphane DAUZÈRE-PÉRÈS, qui m'a accepté comme candidat pour cette thèse, et pour avoir été mon directeur pendant les premiers mois. J'adresse de sincères remerciements à mon encadrant et mes directeurs de thèse, que j'ai beaucoup sollicités : Nabil ABSI, Dominique FEILLET et Xiaolan XIE. La liberté dont j'ai bénéficié durant mes travaux associée à leur disponibilité me font souhaiter à tout doctorant de pouvoir travailler dans les mêmes conditions. Cette équipe dans laquelle j'ai travaillé restera à mes yeux un modèle inégalable de sérieux et d'intégrité.

J'adresse également mes remerciements au Professeur Michel GOURGAND, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de cette thèse, ainsi qu'à l'ensemble des membres de ce jury. Merci plus particulièrement aux Professeurs Evren SAHIN et Jean-Charles BILLAUT, dont les rapports, commentaires et questions constructifs démontrent de leur sincère investissement dans l'évaluation de ces travaux.

Cette thèse a été financée par le Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie, le Conseil Général des Bouches du Rhône et la Direction générale de la compétitivité, de l'industrie et des services (Dgcis), au travers du projet MISTRALS, dont je salue l'ensemble des participants. J'adresse une pensée particulière à l'attention des partenaires hospitaliers de ce projet. Merci beaucoup à Rémy COLLOMP et son équipe, qui malgré tous leurs efforts n'ont pas pu bénéficier au mieux de l'ambition affichée du projet. Merci aussi aux équipes de Christian CHABANNON de l'IPC et de la tumorothèque de Nice, plus particulièrement Lise-Marie et Olivier, qui ont toujours répondu rapidement et efficacement à mes nombreuses questions.

Beaucoup de personnes méritent mes remerciements et que j'exprime ma sympathie à leur égard, du département SFL d'abord mais pas seulement ; quelques-uns ont d'ailleurs quitté l'École depuis quelques temps maintenant... J'ai une pensée particulière pour les habitants du Pesquier, pour ceux du CIS que j'ai eu la chance de côtoyer, pour nos partenaires de Télécom Paris Tech, et aussi pour mes amis, non académiques, qui m'ont soutenu et supporté pendant ces années.

Merci à ceux que j'ai pu côtoyer de plus près : collègues de bureau, relecteurs assidus des premières versions de ce manuscrit, footeux de l'ASMIN, défenseurs et représentants de la caste des doctorants gardannais, membres du Aix Poker Tour, inconditionnels du Tibar...

Tous ont participé à mon bien-être, et à la réussite du Centre Microélectronique de Provence, à qui je souhaite une longue et prospère existence.

Le CMP serait aussi très différent sans l'équipe Infra., sans Scidem et sans Barbara, qui sont tous indispensables et trop peu souvent sur le devant de la scène. Merci à eux pour leur gentillesse et leur sérieux.

J'ai un instant craint de t'oublier, toi dont la déception serait immense si j'avais l'absence d'esprit de ne point te nommer ici. Saches, \_\_\_\_\_<sup>1</sup>, que je te remercie ouvertement pour ton aide si précieuse ! Salut aussi à toi, lecteur anonyme qui a pris le temps de poser les yeux sur cette page ; j'espère sincèrement que ce document contient les informations que tu viens y chercher.

Merci enfin à mes parents, qui m'ont offert la possibilité et la liberté de mener mes études dans les meilleures conditions, et dont le soutien inconditionnel n'a d'égal que l'affection que je leur porte.

---

1. ton nom ici...







# Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>v</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Contexte et problématique</b>	<b>5</b>
1.1 La production de soins . . . . .	5
1.1.1 Le besoin de soins . . . . .	6
1.1.2 L'organisation hospitalière . . . . .	10
1.1.3 Les réformes de l'Hôpital . . . . .	11
1.1.4 Les incidents hospitaliers . . . . .	13
1.1.5 Des besoins de traçabilité renforcés . . . . .	15
1.2 Les technologies d'identification . . . . .	17
1.2.1 Les technologies d'identification . . . . .	17
1.2.2 La diffusion des technologies et des RFID . . . . .	20
1.2.2.1 La diffusion de technologies . . . . .	20
1.2.2.2 Le cas des RFID . . . . .	24
1.2.3 Les RFID dans la chaîne logistique . . . . .	27
1.2.4 Applications au milieu médical . . . . .	31
1.3 Conclusion / Présentation des études de cas . . . . .	34
<b>2 Présentation des outils</b>	<b>39</b>
2.1 Mesure de la performance en Santé . . . . .	39
2.1.1 Indicateurs de performance opérationnels . . . . .	40
2.1.1.1 Le production de soins : des biens et des services . . . . .	40
2.1.1.2 Modèles de représentation et d'étude de performance . . . . .	41
2.1.1.3 Coordination de la mesure de la performance . . . . .	43
2.1.2 La gestion des risques . . . . .	44

2.1.2.1	Quelques méthodes opérationnelles de mesure du risque . . .	44
2.1.3	Notre approche . . . . .	47
2.2	Génie Industriel et Recherche Opérationnelle . . . . .	49
2.2.1	La Recherche Opérationnelle en Santé . . . . .	50
2.2.1.1	La programmation stochastique : . . . . .	50
2.2.1.2	La Programmation Linéaire (PL) et la Programmation Linéaire en Nombre Entiers (PLNE) . . . . .	51
2.2.1.3	Les heuristiques : . . . . .	51
2.2.2	Revue de littérature . . . . .	52
2.3	La simulation . . . . .	55
2.3.0.1	Recommandations générales . . . . .	56
2.3.1	Types de simulation et leurs usages principaux . . . . .	57
2.3.1.1	Mises en conditions : simulation <i>in situ</i> et jeux pédagogiques . . . . .	58
2.3.1.2	Feuilles de calcul . . . . .	58
2.3.1.3	Les modèles markoviens . . . . .	58
2.3.1.4	Simulation à événements discrets (DES : Discrete-Event Simulation) . . . . .	58
2.3.1.5	Systèmes Dynamiques (SD) . . . . .	60
2.3.1.6	Simulation par éléments finis ; simulations morphologiques / Émulations . . . . .	61
2.3.1.7	Réalité virtuelle et réalité augmentée . . . . .	62
2.3.1.8	Comparaisons de différentes méthodes de simulation . . . . .	62
2.4	Conclusion . . . . .	63
<b>3</b>	<b>Étude de l'impact des technologies RFID sur la gestion des tumorothèques</b>	<b>67</b>
3.1	Description du fonctionnement d'une biobanque . . . . .	67
3.2	Identification <i>a priori</i> de facteurs de risques et d'amélioration . . . . .	71
3.3	Description de la solution proposée par MISTRALS . . . . .	73
3.4	Réaffectation des emplacements de cryotubes conservés à l'azote . . . . .	76
3.4.1	Liste des contraintes . . . . .	76
3.4.2	Déroulement des manipulations, déclencheurs et objectifs . . . . .	78
3.4.3	Optimisation de l'activité de re-warehousing . . . . .	79
3.4.4	Vers une politique de prise en compte du long terme . . . . .	82
3.4.4.1	Boxes shifting . . . . .	82
3.4.4.2	Utilisation de la "Moyenne Cible" . . . . .	83
3.4.4.3	Définition d'une "Limite Critique" . . . . .	83

3.5	Modélisation et Simulation . . . . .	85
3.5.1	Implémentation . . . . .	85
3.5.2	Indicateurs de performance retenus . . . . .	93
3.5.3	Paramètres . . . . .	94
3.5.3.1	Probabilités d'erreurs . . . . .	96
3.5.3.2	Scénarios . . . . .	97
3.5.4	Validation . . . . .	97
3.5.5	Résultats . . . . .	99
3.6	Conclusions et perspectives . . . . .	106
<b>4</b>	<b>Évaluation des apports des technologies RFID pour les traitements chimiothé-</b>	
	<b>piques</b>	<b>109</b>
4.1	Le CHU de Nice . . . . .	109
4.1.1	La pharmacie oncologique du CHU de Nice . . . . .	110
4.1.1.1	Gestion des Stocks . . . . .	112
4.1.1.2	Prescriptions - Logiciel CHIMIO . . . . .	114
4.1.1.3	Préparations . . . . .	115
4.1.1.4	Transport . . . . .	117
4.1.1.5	Administration . . . . .	118
4.1.1.6	Traitement des déchets . . . . .	118
4.1.2	Conclusions . . . . .	118
4.2	Etude macroscopique : Logistique de la production de chimiothérapies . . . . .	120
4.2.1	Expériences réalisées . . . . .	121
4.2.2	Indicateurs de performance . . . . .	121
4.2.3	Quelques résultats . . . . .	122
4.2.4	Conclusion . . . . .	122
4.3	Production de solutions chimiothérapiques . . . . .	123
4.3.1	Objectifs et méthode . . . . .	123
4.3.1.1	Considération matérielle : Des détrompeurs infallibles . . . . .	123
4.3.1.2	Mesure de la performance des manipulateurs . . . . .	124
4.3.2	Ordonnancement . . . . .	124
4.3.2.1	Modélisation PLNE . . . . .	127
4.3.2.2	Résolution heuristique . . . . .	128
4.3.3	Évaluation du système . . . . .	130
4.3.3.1	Implémentation . . . . .	131

4.3.3.2	Modélisation des compétences . . . . .	132
4.3.3.3	Évolution des compétences des ressources simulées . . . . .	133
4.3.3.4	Données . . . . .	135
4.3.3.5	Validation de l'ordonnancement et de la simulation . . . . .	137
4.3.3.6	Comparaison des méthodes d'ordonnancement . . . . .	138
4.3.4	Expérimentations / Résultats . . . . .	138
4.3.4.1	Indicateurs de Performance . . . . .	139
4.3.4.2	Fréquence de mise à jour des profils estimés des employés . .	140
4.3.4.3	Fonction utilisée pour mettre à jour des profils estimés des employés . . . . .	141
4.3.4.4	Constance de la performance . . . . .	142
4.3.4.5	Politiques d'ordonnancement . . . . .	144
4.3.5	Conclusions de l'étude . . . . .	146
	<b>Conclusion générale</b>	<b>151</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>157</b>

# Table des figures

1.1	Taux d'hospitalisation par tranches d'âge en court séjour (2009) . . . . .	8
1.2	Carte de France des communes requérant plus de médecins . . . . .	9
1.3	Le modèle dit "Swiss cheese" illustrant comment les défenses, barrières et détrompeurs peuvent être traversés par la trajectoire des accidents. . . . .	14
1.4	Gammes de fréquences, puissance et force du champ utilisés pour les RFID. ( <i>Issu de RFID-Handbook</i> ) . . . . .	18
1.5	Classification des systèmes de produits intelligents _ [Meyer et al. 2009] . . . .	20
1.6	Description du "Hype Cycle of technologies" [Fenn and Raskino 2008] . . . .	21
1.7	Courbe de maturité des nouvelles technologies, Gartner, Juillet 2008 . . . . .	22
1.8	Courbe de Rogers sur l'adoption cumulative "en S" des nouvelles technologies	22
1.9	Courbes des temps d'adoption aux technologies maintenant "courantes" . . . .	23
1.10	Courbes de diffusion des technologies aux Etats-Unis. ( <i>source New York Times</i> )	23
1.11	Illustration du risque d'inefficacité d'un détrompeur . . . . .	30
2.1	Description de la mesure de performance des systèmes de santé. . . . .	41
2.2	Représentation spatiale de critères compétitifs d'efficacité. . . . .	42
2.3	Description du diagramme cause-effet d'Ishikawa [Bachelet 2010] . . . . .	47
2.4	Sujets et niveau décisionnel des étude de Recherche Opérationnelle dans la Santé. (Issu de [Brailsford and Vissers 2010]) . . . . .	54
2.5	Classification de problèmes traités par simulation sur une échelle d'abstraction croissante (vertical) et de l'aspect continuité (abscisse). (Issu de [Borshchev and Filippov 2004]) . . . . .	63
3.1	Diagramme des processus Biobanque . . . . .	69
3.2	Station d'association Tag/Code Barre, Psion. . . . .	74
3.3	Antenne générique, ne permettant pas le positionnement des tubes dans la boîte.	75
3.4	Antenne d'inventoriage assisté des boîtes de cryotubes. ( <i>Credit : Psion Teklogix</i> )	75
3.5	Antenne d'inventoriage rapide des boîtes de cryotubes. ( <i>Credit : Tagsys</i> ) . . . .	75
3.6	Diagramme des processus intra-biobanque intégrant l'activité de re-warehousing	79

3.7	Évolution de la valeur limite "Critical Gap" en fonction de $T_{MAX}$ . . . . .	84
3.8	Tableau des quantités d'activité . . . . .	86
3.9	Arrivée des échantillons, capture d'écran du logiciel Arena . . . . .	86
3.10	Sous-processus des transformations . . . . .	87
3.11	Computerization overview . . . . .	88
3.12	Sous processus de découpage du prélèvement sélectionné en plusieurs aliquots	89
3.13	Décomposition des processus en trois parties (Acte médical, information et vérification). . . . .	89
3.14	Diagramme des classes VBA du modèle. . . . .	92
3.15	Plan de la tumorothèque de l'IPC . . . . .	98
3.16	Performance des scénarios principaux : Processing Times (en haut), et pourcentages d'utilisation des ressources humaines et du nombre de racks achetés par rapport au maximum (en bas) . . . . .	101
3.17	Observed Errors on the Non-Rewarehousing Scenarios, depending on Employee Performance Level (EPL) . . . . .	103
3.18	Results on Re-Warehousing . . . . .	105
4.1	Diagramme des activités pour la préparation de cytotoxiques . . . . .	111
4.2	Fiche d'inventaire de la pharmacie de l'Archet2. . . . .	112
4.3	Plan de la salle de l'isolateur, pharmacie de l'Archet2 [El Yousfi 2010] . . . . .	113
4.4	Diagramme des processus de chimiothérapie [El Yousfi 2010] . . . . .	120
4.5	Diagramme du fonctionnement de la simulation . . . . .	131
4.6	"Time to perform a simple task on a linear and log-log plot as well as a power law fit to the data (adapted from Seibel, 1963)." . . . .	133
4.7	Exemple d'évolution des compétences d'un manipulateur inexpérimenté (à gauche) et expérimenté (à droite) travaillant quotidiennement. . . . .	135
4.8	Représentation des quantités d'activité des fichiers de demande prévisionnelle. Une unité de temps (axe vertical) égale 5 minutes. . . . .	136

# Liste des tableaux

1.1	Espérance de vie en bonne santé . . . . .	7
3.1	Temps des déplacements entre les zones (en secondes). . . . .	95
3.2	Tableau des principales données définissant les scénarios (non exhaustif) . . . .	97
3.3	Performance des scénarios principaux . . . . .	100
3.4	Erreurs observées sur les scénarios sans re-warehousing suivant le Niveau de Performance (NdP) des employés. . . . .	102
3.5	Comparaison des configurations concernant le Re-Warehousing . . . . .	104
4.1	Taux d'utilisation des ressources à l'isolateur suivant le scénario technologique	122
4.2	Paramètres des tâches composant l' <i>instance connue</i> . . . . .	138
4.3	Comparaison des ordonnancements générés via CPLEX et Tabou. <i>Les écarts sont moyennés par rapport au nombre de borne inf. non atteintes.</i> . . . . .	139
4.4	Fréquence de mise à jour de la performance estimée des manipulateurs . . . . .	141
4.5	Comparaison des fonctions d'estimation de la performance des manipulateurs .	142
4.6	Impact de l'irrégularité des temps de manipulation observés . . . . .	143
4.7	Stratégies d'affectation des ressources aux postes de l'isolateur. . . . .	144
4.8	Stratégies de génération de l'ordonnancement et de dégradation anticipée de la performance. . . . .	145





# Introduction générale

L'innovation médicale est intimement liée aux progrès technologiques concernant la création et l'utilisation de nouveaux matériaux, la miniaturisation d'outils et instruments, l'exploration du corps et des cellules qui améliorent la compréhension de leur fonctionnement. Les progrès fulgurants de la médecine prolongent la durée de vie, permettant de survivre à des maladies graves et d'avoir une vie normale malgré la contraction de pathologies chroniques, voire d'infirmités qui pourraient prochainement n'être que temporaires. Ces innovations impliquent une forte augmentation des budgets de santé publique, qui représentent une partie importante du budget des pays développés. Les traitements des maladies chroniques imposent une nouvelle approche de la médecine, qui ne vise plus seulement la guérison mais qui doit incorporer une notion d'accompagnement du malade.

Le vieillissement des populations implique un besoin de soins de plus en plus important. Les contraintes économiques poussent la recherche de l'amélioration du fonctionnement des établissements hospitaliers. L'amélioration des activités de production de soins passe par une adaptation des méthodes scientifiques qui ont servi la production industrielle. La principale particularité de la production de soins est l'omniprésence du facteur humain, qui appose un caractère fortement stochastique tant au niveau de la demande qu'au niveau de la réponse à cette demande et la perception de cette réponse. Aussi, si l'évaluation de la qualité d'un traitement est difficile, la qualité d'un système sanitaire l'est bien plus, il en va donc de même pour la recherche de son amélioration, bien que certains points sont incontournables.

Les objectifs d'efficience et d'efficacité ne doivent en aucun cas mettre en cause la qualité des soins ou augmenter le risque de mauvais traitement. La traçabilité joue un rôle important dans cette maîtrise du risque, et les normes d'accréditation et réglementations imposant un haut niveau de traçabilité ne peuvent qu'être louées, même si certaines d'entre elles ont un objectif originel purement économique, comme la tarification à l'activité. Le passage du code-barres au *DataMatrix* est un exemple de la prise en compte des problématiques de qualité de soins, même si les efforts nécessaires pour une généralisation de l'informatisation et l'adoption technologique ont pu être sous-estimés.

En parallèle à cela, les nouvelles technologies d'informatisation et de communication comme les technologies sans contact, gagnent en maturité. On peut notamment observer leur pertinence au travers de l'utilisation qui en est faite dans la production et la distribution de biens industriels ainsi qu'au travers du développement d'applications nécessitant l'identification des personnes, qui ne cessent d'augmenter.

Ce sujet d'étude, et le financement associé, sont liés à l'existence d'un projet dont l'ambition est de définir et d'évaluer la pertinence de deux pilotes de l'utilisation de technologies

---

RFID. Ce projet, nommé MISTRALS<sup>2</sup>, répond à un appel à projets de valorisation des technologies sans contact, émis par le Fond Unique Interministériel français. Ses objectifs sont de valider la faisabilité de l'utilisation de technologies de radio-identification dans les conditions particulières. Les deux cas d'usage sont le centre de pharmacologie oncologique de l'hôpital de l'Archet (Nice) et les biobanques tumorales (ou tumorothèques) du CHU de Nice et de l'Institut Paoli Calmettes (Marseille).

Cette thèse propose de s'appuyer sur ces deux études afin d'estimer les impacts potentiels des technologies RFID dans le contexte hospitalier et de la production de soins. Elle s'articule en quatre chapitres.

Le premier chapitre s'attache à décrire le contexte sanitaire et technologique évoqué dans cette introduction. Nous précisons certains points de l'organisation hospitalière, des problèmes qui peuvent y survenir, ainsi que l'état de déploiement des technologies radio-communicantes dans un contexte général. Nous décrivons dans un second chapitre introductif les outils, opérationnels et prospectifs, qui permettent d'estimer la performance d'un système hospitalier et d'en optimiser le fonctionnement. Les chapitres 3 et 4 concernent les deux cas d'étude intégrés au projet MISTRALS au travers desquels nous décrivons les potentiels bénéfiques que l'on peut tirer de l'utilisation de technologies auto-communicantes. Concernant le cas d'application aux tumorothèques, chapitre 3, nous avons modélisé le fonctionnement de ces biobanques dans le logiciel de simulation à événements discrets. Une approche descriptive adaptée à l'implémentation des bénéfices "génériques" des impacts des technologies est utilisée pour faciliter la configuration du modèle dans l'optique de pouvoir aisément comparer différentes configurations matérielles. Les apports des technologies permettent d'inventorier les boîtes de cryotubes stockées à très basse température rapidement et précisément. Cette observation pousse à définir et étudier des possibilités de la mise en place de l'activité de concaténation de ces boîtes. Cette activité et une approche d'optimisation la concernant sont intégrées au modèle de simulation, au travers duquel nous comparons différentes possibilités d'implémentation de cette activité.

Le quatrième chapitre concerne l'utilisation des technologies auto-communicantes dans le cadre de la production de cytotoxiques. Suite à une description du service partenaire, nous supposons une implémentation idéalisée des technologies qui permet à la fois de s'autoriser à faire travailler du personnel peu expérimenté de manière autonome et d'acquérir des données fiables pour paramétrer les profils et niveaux de performance des ressources. Cette supposition nous permet de nous pencher sur un problème d'ordonnancement de la production avec prise en compte de l'évolution du niveau d'expérience des manipulateurs. Une simulation à événements discrets a été développée pour conduire cette étude.

Les enjeux de cette étude sont de définir des indicateurs adaptés aux cas d'implémentation des techniques qui nous sont proposées, de définir des particularités de l'implémentation des technologies adaptées et de proposer des approches d'optimisation de la définition de solutions technologiques basées sur l'utilisation de technologies de communication sans contact.

---

2. MISTRALS est le presque-acronyme pour "Mutualisation Informatique des Solutions Technologiques pour la Recherche pharmaceutique et Sa Santé"





# Chapitre 1

## Contexte et problématique

Cette introduction présente le contexte global dans lequel cette étude a eu lieu. Nous y aborderons les deux sujets composant le thème des travaux rapportés dans ce mémoire de thèse que sont la production de soins et les technologies de communication sans contact. Cette thèse a été financée en parallèle à un projet baptisé *MISTRALS*, pour Mutualisation Informatique des Systèmes Technologiques pour la Recherche pharmaceutique et La Santé. Ce projet a répondu à un appel à projets de valorisation des technologies sans contact, émis par le Fond Unique Interministériel. Il a été labellisé par le pôle de compétitivité mondial Solutions Communicantes Sécurisées (SCS), son objectif étant de définir et mettre en place des solutions technologiques dans des tumorothèques et un centre pharmacotechnique de production de chimiothérapies.

### 1.1 La production de soins

*"La santé est un état de complet bien-être physique, mental et social, et ne consiste pas seulement en une absence de maladie ou d'infirmité."* [[WorldHealthOrganisation 1946](#)]

On peut avoir tendance à qualifier la santé comme l'absence de maladies, c'était d'ailleurs le sens officiel de ce terme jusqu'au milieu du siècle dernier. L'application de cette définition n'a pas été instantanée, mais des maladies comme la dépression sont aujourd'hui unanimement reconnues dans les sociétés développées. La notion de santé est en effet dépendante du contexte dans lequel se positionne le patient. Il est également possible que quelqu'un atteint d'une maladie chronique sous traitement soit en "bonne santé". On peut prendre l'exemple du diabète, pour lequel des traitements efficaces existent, la bonne acceptation de l'hygiène de vie imposée aux malades leur permet alors d'être en bonne santé conformément à la définition donnée ci-dessus. Nous parlerons ici de production de soins lorsque l'objectif de l'activité est la guérison, signifiant l'accès à un niveau de santé physique convenable, cette vision légèrement réductrice nous est dictée par les services auxquels nous nous sommes intéressés. La santé est toutefois un concept subjectif ; le contexte sociologique et l'état psychologique du patient entrent en compte dans la définition de son état de santé. Il conviendra donc de conserver à l'esprit les aspects intrinsèquement humains de la production de soins, d'où une grande difficulté à qualifier la qualité d'un ensemble de services sanitaires.

Les problèmes soulevés dans cette partie générale et dans la suite de ce document ont un aspect certes financier, mais également politique et social. La vision d'un malade qui n'aura plus à faire un long trajet suivi d'une attente pouvant durer jusqu'à plusieurs heures n'est pas la même que celle d'un praticien qui se demande s'il sera bon pour lui de déménager à plusieurs centaines de kilomètres de sa résidence actuelle, ou de négliger sa vie familiale pour s'adapter à de nouveaux créneaux horaires. Ce n'est pas non plus le même point de vue que celui du responsable politique du moment qui doit, en plus de satisfaire un maximum de ses potentiels futurs électeurs, se préoccuper des coûts engendrés par cette opération et des alternatives se présentant à lui. Les objectifs divergents et parfois même conflictuels des différents décideurs du monde hospitalier, qu'ils en soient acteurs directs ou non, posent clairement le problème de pondérer et rassembler l'ensemble des indicateurs de qualité inhérents aux différents corps de métier composant l'hôpital [Minvielle et al. 2007]. La dématérialisation des informations et des actes médicaux aura certainement des conséquences positives, car les hospitalisations et accidents médicaux dus à un manque d'informations, "occasionnent chaque année plus de 128 000 hospitalisations, et provoquent plus de décès que les accidents de la route" [Honnorat 2008]. Elle soulève toutefois des craintes, notamment au niveau du respect de la confidentialité et de la possible délocalisation de l'expertise médicale.

Après avoir évoqué quelques informations générales concernant l'évolution du besoin et de l'offre de soins, nous soulèverons diverses problématiques propres à l'organisation médicale. Nous évoquerons l'importance des Technologies de l'Information et de la Communication (TICs), leur impact sur la traçabilité et les améliorations que l'on peut espérer en généralisant leur déploiement.

### 1.1.1 Le besoin de soins

*"Tout bien portant est un malade qui s'ignore", Dr. Knock (Personnage de Jules Romains, 1923).*

Cet aphorisme issu d'une pièce de théâtre satyrique peut être interprété à différents degrés. Sorti de son contexte, il n'est pas évident de contre-argumenter le fait que nous atteindrons tous un état de santé morbide. La définition de la "bonne santé" telle que donnée précédemment apporte un caractère particulièrement fragile à cet état ; si être en bonne santé n'est pas incompatible avec le fait d'être atteint de maladie, la bien-portance apparente n'implique pas forcément d'être en bonne santé. Certaines études peuvent par ailleurs appuyer cette affirmation de manière plus directe. Par exemple, une enquête canadienne [Statistique Canada 2010] indique qu'environ 3% de la population canadienne adulte avait un problème d'hypertension non diagnostiqué en 2009. Le fait que ce type d'études existe peut-être considéré comme un premier facteur de l'augmentation du besoin de soin car elles incitent au dépistage. Nous allons brièvement mettre en relation l'évolution de ce besoin avec l'évolution de l'offre de soins.

Chan et al. [2009] reportent les prédictions récentes quant à l'évolution de la démographie mondiale, qu'ils mettent en relation avec la limitation du personnel pour expliquer le besoin de faciliter l'accès à la télémédecine afin de répondre à la demande [Bodenheimer et al. 2002; Paré et al. 2007]. Il a été estimé que l'espérance de vie pourrait passer de 46-89 ans à 66-93 ans durant le 21<sup>ème</sup> siècle, et que le ratio 15/65 ans pourrait être de 4 pour 1 en 2050, alors qu'il est de 9 pour 1 actuellement. Le rapport Health, United States de 2009 [Sebelius et al. 2009]

Tableau 1.1 – Espérance de vie en bonne santé

	1995	2000	2001	2002		2003		2004		2005		2006	2007	2008
<b>HOMMES</b>														
Allemagne	60,0	63,2	64,1	64,4	(e)	65,0	(e)	:		55,0	(b)	58,5	58,8	55,8
Espagne	64,2	66,5	66,0	66,6	(e)	66,8	(e)	62,5	(b)	63,2		63,7	63,2	63,7
France	60,0	60,1	60,5	60,4	(e)	60,6	(e)	61,2	(b)	62,0		62,7	63	62,4
Italie	66,7	69,7	69,8	70,4	(e)	70,9	(e)	67,9	(b)	65,7		64,7	62,8	:
Royaume-Uni	60,6	61,3	61,1	61,4	(e)	61,5	(e)	:		63,2	(b)	65,0	64,8	:
Suède	:	63,1	61,9	62,4	(e)	62,5	(e)	62,0	(b)	64,2		67,1	67,5	69,2
<b>FEMMES</b>														
Allemagne	64,3	64,6	64,5	64,5	(e)	64,7	(e)	:		55,1	(b)	58,0	58,3	57,4
Espagne	67,7	69,3	69,2	69,9	(e)	70,2	(e)	62,5	(b)	63,1		63,3	62,9	63,2
France	62,4	63,2	63,3	63,7	(e)	63,9	(e)	64,1	(b)	64,3		64,1	64,2	64,2
Italie	70,0	72,9	73,0	73,9	(e)	74,4	(e)	70,2	(b)	66,5		64,1	61,9	:
Royaume-Uni	61,2	61,2	60,8	60,9	(e)	60,9	(e)	:		65,0	(b)	65,1	66,1	:
Suède	:	61,9	61,0	61,9	(e)	62,2	(e)	60,9	(b)	63,1		67,1	66,6	68,7

": " = Non disponible, "e" = Valeur estimée, "b" = Rupture de série, "p" = Valeur provisoire. Source : Eurostat. Dernière mise à jour : 10.12.2010

projetée ainsi que la proportion des nord-américains âgés de plus de 65 ans passerait de 12% en 2007 à 20% en 2040, alors qu'elle était de 11% en 1980. Ces prévisions de chute de la natalité et de prolongement de la durée de vie globale peuvent poser problème, au niveau du manque de personnel médical évidemment, mais également au regard des systèmes de sécurité sociale ou de retraites par répartition comme nous les connaissons en France.

Il conviendrait toutefois de mettre des données en relation avec un indicateur important, l'espérance de vie en bonne santé. Celui-ci représente le nombre d'années qu'un nouveau né peut s'attendre à vivre en bonne santé, c'est à dire sans limitation d'activité ni "incapacité majeure liée à des maladies chroniques, aux séquelles d'affections aiguës ou de traumatismes" [INSEE 2009]. Le tableau récapitulatif de l'indicateur "Années de Vie en Bonne Santé" (AVBS) de Décembre 2010, reproduit tableau 1.1, montre une stagnation générale de cet indicateur, voire une nette régression dans certains pays comme l'Italie ou l'Espagne.

Le graphique reporté figure 1.1, produit par l'Institut de Recherche et Documentation en Économie de la Santé [IRDES 2009], montre le taux d'hospitalisation en séjour court par tranches d'âge. Les statistiques indiquent une réduction globale de ces durées de séjour, donnant des précisions par pays et par catégorie de diagnostic. La forte augmentation du nombre d'interventions reportée sur le graphique nous permet d'affirmer que le vieillissement de la population devrait donc mener à une forte augmentation du nombre d'interventions hospitalières. Parmi ces séjours, un tiers ont eu une durée de moins de 24 heures, et 53.9% concernaient les femmes.

En parallèle à cela, d'après le ministère de la santé, près de 2,6 millions de Français rencontreraient des difficultés pour accéder aux soins, que ce soit pour trouver un médecin généraliste, un spécialiste ou un professionnel de santé [Direction Générale de la Santé 2008]. Il est également prévu que le nombre de médecins pourrait chuter de 10% d'ici quinze ans, réduisant la densité médicale à sa valeur de l'année 1980 avec 283 médecins pour 100 000 habitants. Leur nombre est en France régulée au travers du *numerus clausus*. Cet outil, introduit en 1971, fixe le



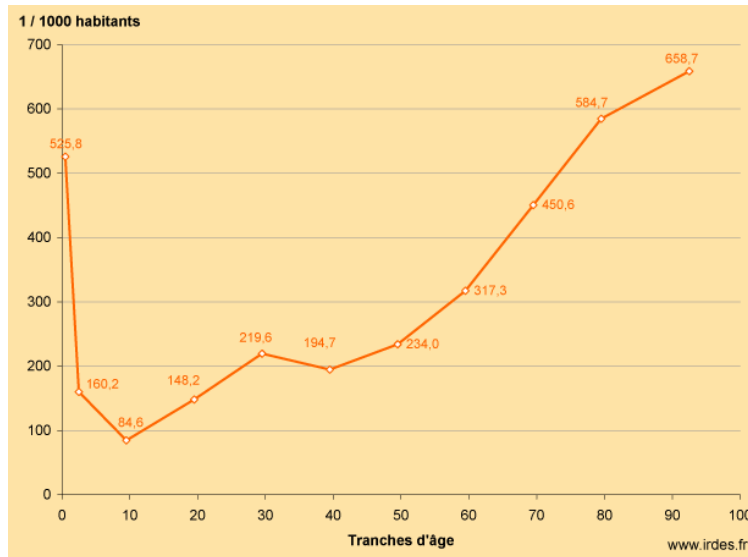


FIGURE 1.1 – Taux d’hospitalisation par tranches d’âge en court séjour (2009)

nombre de places en deuxième année de médecine ; sa modification impactera donc l’évolution du nombre de praticiens après environ 9 ans. Initialement fixé à 8588 places, la mobilisation des syndicats de médecins a impliqué des restrictions sur le *numerus clausus* jusqu’en 1993, soit 5 ans après la mise en place d’une politique de retraites anticipées qui dura 15 ans ; il avait alors atteint 3500 places. À partir des années 2000, la pénurie de médecins commence à être dénoncée ; le *numerus clausus* est depuis augmenté chaque année ; il atteint 7300 places en 2008 et 7400 depuis. D’après [HCAAM 2007], la densité de généralistes en France est toutefois la deuxième de l’OCDE ; il semble que le vrai problème en matière d’accès aux soins ne soit pas le manque de médecins mais leur répartition géographique. La figure 1.2, issue de [INSEE 2008], montre la répartition inégale de la proportion de médecins généralistes par rapport à la population.

Les importantes disparités soulèvent la question de la consultation distante, de son efficacité suivant les cas, et de sa faisabilité au regard notamment de la protection des données. Concernant la faisabilité technique d’abord, plusieurs centaines de milliers de personnes étaient, en 2007, inéligibles à l’ADSL. La comparaison entre les communes en manque de médecins et la carte d’éligibilité à l’ADSL [Société ARIASE 2007] indique certaines similitudes, notamment en Auvergne, Bourgogne, Champagne-Ardenne ou Languedoc-Roussillon. La solution pour ces cas particuliers est alors de se tourner vers une offre d’accès à l’Internet par satellite, ou bien sûr d’offrir un service de télé-consultation de qualité suffisante via un modem 56k.

La télé-consultation a donc, pour autant qu’il soit possible d’avoir accès à ce service, l’avantage de faciliter l’accès aux soins, mais elle laisse entrevoir une industrialisation de la médecine, avec tous les risques que cela comporte : recherche du rendement maximal, déshumanisation, méconnaissance du patient, risque d’interception des communications, usurpations d’identité ou de compétences... Concernant les risques de divulgation des informations personnelles, le Conseil National de l’Ordre des Médecins se veut rassurant. Il propose, dans un rapport adopté le 18 Juin 2010 [Lucas 2010], que les règles d’accès et de modification aux données soient clai-

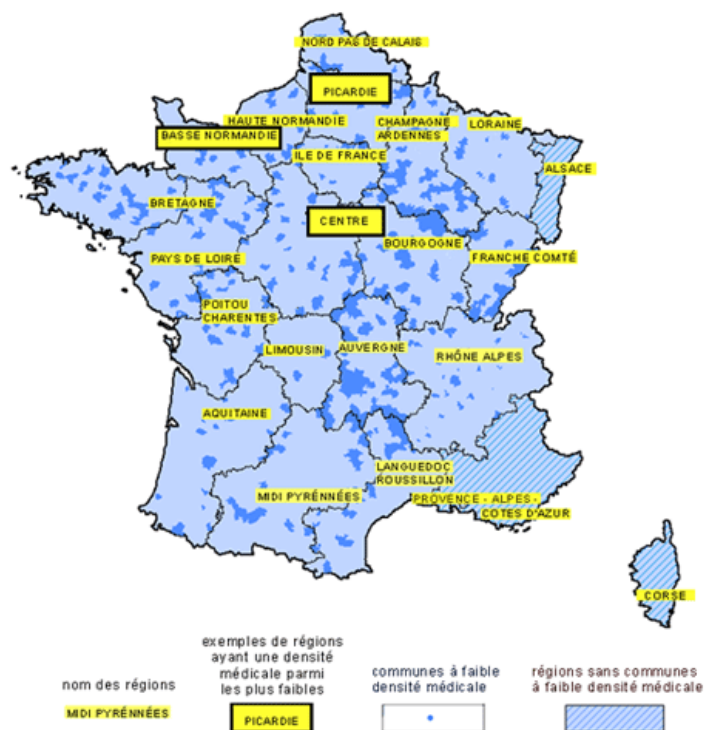


FIGURE 1.2 – Carte de France des communes requérant plus de médecins

rement définies, comme c’est le cas pour le Dossier Médical Personnel, et que les connexions soient tracées (et donc surveillées).

Le décret 2010-1229 du 19 octobre 2010 [Fillon 2010] introduit au code de la santé publique un chapitre dédié à la définition, aux conditions de mise en œuvre et à l’organisation de la télémédecine en France. La télémédecine y est décrite comme un acte médical réalisé à distance au moyen d’un dispositif utilisant les Technologies de l’Information et de la Communication (TICs). Elle inclut la téléconsultation, la téléexpertise, la télésurveillance médicale (aussi appelée télémonitoring), la téléassistance et la réponse médicale.

Cette adjonction montre bien l’importance grandissante qu’ont les TICs dans la production de soins. Un second projet important de l’introduction et de l’utilisation efficace des TICs pour la santé, que l’on peut voir comme prérequis à une télémédecine sûre, est la mise en place du Dossier Médical Personnel (DMP). L’utilisation de la première version du DMP national est prévue à partir de Décembre 2010 et progressivement durant l’année 2011 [Direction Générale de la Santé 2010]. Son intérêt pourra être appuyé de part la capacité du DMP à permettre des relevés d’informations permettant d’observer et de réduire considérablement les incidents hospitaliers que nous décrivons dans la section 1.1.4.

Ces observations et estimations définissent un premier problème qui se pose aux systèmes de production de soins et aux organisations hospitalières : les changements démographiques et donc du besoin en parallèle à l’évolution du personnel médical impliquent la nécessité d’augmenter l’efficacité des systèmes de soins, et notamment de la prise en charge des maladies chroniques [Chan et al. 2009]. L’impact économique de la santé est parmi les plus importants,

sinon le plus important des dépenses publiques dans les pays développés, et les progrès médicaux incessants participent à cette augmentation de coût en même temps qu'ils prolongent la vie. La section suivante donne plus de détails concernant l'organisation de la production de soins dans le milieu hospitalier, notamment au niveau de la prise de décisions organisationnelles.

### 1.1.2 L'organisation hospitalière

La production de soins est une activité dans laquelle l'incertitude est omniprésente. On "prodigue" des soins pour répondre à une demande particulière, souvent sur mesure. Les différents services sont difficilement regroupables et le personnel souvent spécialisé ; le dimensionnement de chacun étant difficile à cause de l'omniprésence d'incertitudes.

Les caractéristiques de la production de soins incluent la particularité de l'interaction entre patients et médecins [Seila and Brailsford 2009]. Tous deux peuvent prendre à chaque instant la décision d'arrêter, continuer, modifier le planning ou basculer vers un autre processus. Le nombre, l'ordre d'occurrence et la durée de chaque processus peut grandement varier d'un patient à un autre, même si certaines procédures sont assez standardisées pour que ces variations soient prévisibles. Cette différence avec les processus de production standardisés rend nécessaire le fait de disposer d'outils de traçabilité efficaces.

Au travers d'une étude visant la maîtrise des coûts au quartier opératoire d'un hôpital belge, Hut and Nguyen [2010] soulèvent certaines particularités importantes qui se retrouvent dans d'autres services hospitaliers. Tout d'abord, les auteurs citent le besoin d'adapter les ressources humaines, matérielles et technologiques aux besoins. Tous les acteurs vont être amenés à "repenser leur façon de travailler et surtout leur manière d'être". Parmi les problèmes mentionnés, on retrouve la surévaluation et l'inconstance des demandes de périodes d'accès aux quartiers opératoires. Les principales solutions proposées pour améliorer la gestion et la maîtrise de coûts sont de mettre à disposition un modèle d'allocation des coûts et de sensibiliser les utilisateurs concernant leur marge de manœuvre. Reste l'aspect variable de la production de soins, chirurgicaux dans ce cas, inhérent au fait que l'on produit un service de modification d'un corps (humain) vivant au travers d'actes accomplis principalement par des humains.

Les observations décrites dans le paragraphe précédent sont cohérentes avec la description des particularités du milieu hospitalier effectuée par Vissers [2001]. Les points évoqués incluent l'aspect particulier du management, car différents décideurs peuvent être impliqués au même niveau décisionnel. Leurs rôles et responsabilités ne sont en effet pas forcément clairement délimités ou se chevauchent. Le management est souvent double, les responsabilités étant partagées entre professionnels médicaux et managers administratifs. Le processus de prise de décisions peut être ambigu à cause de ce manque de clarté. Ainsi, le processus de prise de décision prend souvent la forme d'une recherche de consensus entre managers, médecins, infirmiers, paramédicaux et personnel administratif. Les points de vue divergent fréquemment concernant les priorités, principalement concernant les rapports entre qualité et coûts, ou efficacité et efficience.

Une autre source de tension et de difficulté propre à l'organisation hospitalière est décrite par Dalton et al. [2008], qui dénoncent la troisième crise hospitalière que vivent les Etats-Unis. Ils mettent notamment en exergue le manque de possibilités pour les praticiens de s'assurer convenablement en cas de procès pour mauvaise pratique et le fait que les erreurs médicales évitables sont mal prises en compte par les réformes judiciaires. Les auteurs insistent sur la nécessité

d'instaurer une culture des bonnes pratiques, passant par un report honnête et constant des incidents dans le but d'en identifier au mieux les causes et ainsi éviter qu'elles ne se reproduisent. Cette transparence paraît difficilement applicable à court terme car les praticiens et responsables peuvent justement craindre que ces informations ne soient par la suite utilisées par les victimes d'accidents pour appuyer des procès aux verdicts tellement onéreux que les prix des assurances ne cessent d'augmenter. La conséquence est que certains traitements à risque, et donc certains patients, se voient abandonnés. Certains praticiens vont jusqu'à prendre une retraite anticipée. Ces réactions fort compréhensibles ne font finalement que rendre plus difficile l'accès aux soins.

En dehors des coûts d'assurance, très variables suivant les régions du monde, la santé a un coût important. Elle représente depuis plusieurs années la principale industrie domestique des États-Unis, et globalement l'une des plus importantes du monde [Carter 2002].

Bien conscient de ces problèmes, les gouvernements mettent en place d'importantes réformes de la gouvernance hospitalière et du financement des établissements de santé. La section suivante décrit les plus importantes de ces réformes.

### 1.1.3 Les réformes de l'Hôpital

Au niveau Français, le "plan de modernisation de l'hôpital" inclut un certain nombre de réformes qui modifient le fonctionnement des centres hospitaliers et le quotidien des praticiens. Parmi ces réformes, de grands chantiers ont pour objectif d'améliorer l'organisation hospitalière au travers notamment d'une harmonisation et d'une meilleure mesure de sa performance et des dépenses, d'une plus importante sensibilisation et responsabilisation des acteurs de santé.

L'exemple le plus significatif est l'instauration de la Tarification à l'activité (T2A) et de la convergence tarifaire sous-tendue [Fédération Hospitalière de France 2010]. Ces réformes ont mené les instituts sanitaires à mieux évaluer les coûts des différentes activités nécessaires au traitement de chaque patient. Si l'obligation de tenir un Système d'Information Hospitalier (SIH) a été progressivement rendue obligatoire pour les établissements de santé depuis 1991, ce n'est qu'à partir de 2004 que la T2A commence progressivement à être instaurée, non sans mal. Les référentiels locaux sont remplacés par des référentiels nationaux. Cette réforme et ses implications ont mené à des incohérences du fait que les établissements de santé se voient fixés des objectifs d'amélioration de la qualité, de la sécurité et de l'offre de soins alors que des coupes budgétaires leur sont opérées au travers de la sous-évaluation de certains coûts de traitement et de fonctionnement. Il est par contre indéniable qu'elle a poussé l'efficacité des établissements de santé et la création de tableaux de bords ; autrement dit mieux évaluer la performance pour l'améliorer efficacement.

[Canada 2010] est un exemple très similaire. L'article nous informe que le financement des hôpitaux de Colombie-Britannique devrait progressivement basculer vers une dotation à la performance et qu'une partie du financement sera allouée en fonction du nombre de patients traités. Le ministre a annoncé que "D'ici 2012-2013, 20 % du budget pour les soins intensifs devrait être basé sur la performance". Cette approche peut avoir des effets bénéfiques, à condition que des outils appropriés soient mis à disposition du personnel et des décideurs, comme l'a montré l'étude précédemment citée. Une responsabilisation efficace ne peut pas être mise en pratique sans que les protagonistes n'aient accès à un tableau de bord. Les obligations de traçabilité

n'ont pas toujours abouti à une utilisation efficace des données relevées, et les hôpitaux publics ont parfois attendu l'obligation imposée par la T2A pour chercher à quantifier exactement les ressources utilisées pour chaque étape de traitement de chaque patient. Rappelons que les fortes pressions subies par l'ensemble du personnel ne laissent que peu de ressources (et de moyens) disponibles pour penser et implémenter de tels systèmes par eux-mêmes. Le financement à la performance est une idée intéressante et semble légitime, mais qui implique de disposer de moyens efficaces et complets de quantifier la performance. Nous abordons ce problème plus en détails dans la section 2.1.

Pour revenir aux réformes françaises, la loi "Hôpital, patients, santé et territoires" (HPST) de 2009 a créé les Agences Régionales de Santé (ARS). Ces structures ont pour objectif d'assurer le pilotage et l'organisation au niveau régional des offres de soins ainsi que les politiques de santé publique. Elles sont une suite logique aux observations portées au travers des différentes générations de Schémas Régionaux d'Organisation Sanitaire (SROS). La mutualisation de ressources et le regroupement de services en pôles veut réduire les coûts de ceux-ci sans réduire l'éventail des services disponibles dans une zone géographique.

[Peju et al. 2005] est un rapport issu d'un sondage effectué en 2005 auprès de praticiens hospitaliers concernant ces chantiers de modification du fonctionnement des hôpitaux. Il contient quelques points appuyant le besoin des réformes en cours, comme le fait que 60% des praticiens estiment que la gestion financière de leur hôpital n'est plutôt pas, voire pas du tout satisfaisante. Ce critère a reçu l'indice de satisfaction le moins élevé. Vient ensuite l'"optimisation de l'allocation des moyens entre services", qui n'est pas dénué de rapports avec le précédent. Les problèmes concernant la gestion financière des hôpitaux est donc à cette date un fait dont les médecins hospitaliers ont eux-mêmes conscience. Les réformes engagées n'auront toutefois pas toujours un bon accueil, notamment car certaines décisions paraissent inadaptées à certains cas particuliers.

Rappelons que la gestion d'un hôpital n'a rien d'aisé, et que la conduite du changement en son sein ne l'est donc pas non plus. La diversité des acteurs et intervenants, une intense charge émotionnelle et des consignes de sécurités pouvant être perçues comme contraignantes donnent lieu à des logiques de fonctionnement différentes, à des conflits de territoires et à des conceptions parfois très divergentes sur l'optimisation de la prise en charge des patients. De plus, les hôpitaux en France se déclinent en trois classes principales : Publics, privés à but lucratif et privés à but non lucratif. Ces trois types d'établissements ont pour objectif commun d'améliorer leur efficacité sans réduire la qualité des soins prodigués. On pourrait noter certaines contraintes particulières et différences de comportement des acteurs suivant si ils exercent dans un type d'établissement ou l'autre, mais ces différences tendent à se réduire et ne nous intéressent pas directement.

Le plan Cancer II (ou Plan Cancer 2009-2013) nous touche plus particulièrement, car les systèmes étudiés dans cette thèse sont en rapport étroit avec cet ensemble de maladies. Il vise à définir un ensemble de mesures visant une lutte contre le cancer (prévention, traitement et accompagnement) plus juste et efficace au travers de 30 mesures, dont certains détails restent à définir, pour un coût prévu de 733 millions d'euros sur sa durée. Les mesures principales concernent la sélection de sites à fort potentiel translationnel, qui auront pour rôle d'accélérer les interactions entre la recherche et l'application de soins. Une importante augmentation du

nombre d'essais cliniques sur malades aura également lieu, avec une prépondérance des populations les plus vulnérables. Les objectifs plus globaux sont la caractérisation des risques environnementaux et comportementaux, une observation continue de l'évolution des pathologies oncologiques, un meilleur dépistage, une personnalisation plus importante des programmes de soins et un meilleur accompagnement pendant et après un traitement. Certaines de ces mesures impliquent l'utilisation d'outils de partage de l'information et de traçabilité de qualité. Des défauts de traçabilité peuvent en effet mener à l'interprétation d'observations erronées dans le cas de la recherche, ou à la mort du patient dans le cas d'un traitement à faible index thérapeutique comme le sont les cytotoxiques. Cela nous mène à nous pencher sur les occurrences des erreurs et incidents médicaux.

### 1.1.4 Les incidents hospitaliers

Les incidents iatrogènes, c'est à dire les effets néfastes dus à un acte médical, affectaient à eux seuls de 10 à 15.4% des patients hospitalisés en France [Michel et al. 2003] il y a quelques années ; le nombre de décès suite à ce genre d'erreurs a été estimé entre 48000 et 98000 en 1997 aux Etats-Unis [Marcellis-Warin 2003] [Kohn et al. 2000], chiffre du même ordre que le nombre de victimes d'accidents mortels de la route, comparable au crash d'un Boeing 747, qui contient environ 450 places, tous les deux jours [Bonnabry 2007].

Clancy [2004] classe les erreurs de médication suivant leurs origines. La proportion d'erreurs de prescription, calculée au travers de 334 erreurs, était de 34%. Ces erreurs ne sont que rarement dues au fait que les médecins se sont trompés, mais plus souvent la résultante d'un ensemble d'incidents, comme le montre bien le modèle dit "swiss cheese", décrit dans [Reason 2000] (voir Figure 1.3). Cette illustration représente les barrières de détection et prévention successives mises en place pour éviter que des accidents ne se produisent. Reason [2000] décrit métaphoriquement ces barrières comme des tranches de fromage, comportant de nombreux trous. Les couches successives représentent les étapes de vérification censées capter les erreurs et prévenir leur propagation. Quasiment tous les événements indésirables sont associés à un processus de vérification, l'occurrence d'accidents est issue d'une combinaison d'incidents prévenables qui n'ont pas été observés ou dont la portée a pu être négligée.

Plus récemment, [Zhanand et al. 2008] observe que, suivant le type et le lieu de la production et de l'administration des soins, les processus et protagonistes principaux de l'apparition d'erreurs sont différents. De plus, les acteurs décelant les erreurs sont parfois les plus à même d'en produire. Les auteurs restent cependant prudents quant à l'importance et l'utilité des systèmes de rapport d'erreurs médicales systématiques à cause des inexactitudes qu'ils peuvent receler.

Ils peuvent ainsi être dus à un manque d'information relatives aux antécédents médicaux du patient, à des erreurs d'analyses, ayant potentiellement eu lieu lors de la préparation des échantillons, leur analyse ou encore le retour d'informations. Les erreurs de retranscription et de préparation sont, suivant cette étude, équitablement responsables de 23% des erreurs. L'amélioration du fonctionnement des centres d'analyses, et notamment de la traçabilité des échantillons biologiques, pourrait donc permettre de réduire le nombre d'erreurs médicales. L'identification d'échantillons biologiques a une importance comparable à celle de l'identification d'un patient à qui nous allons faire subir un traitement. On peut par exemple imaginer une double erreur de



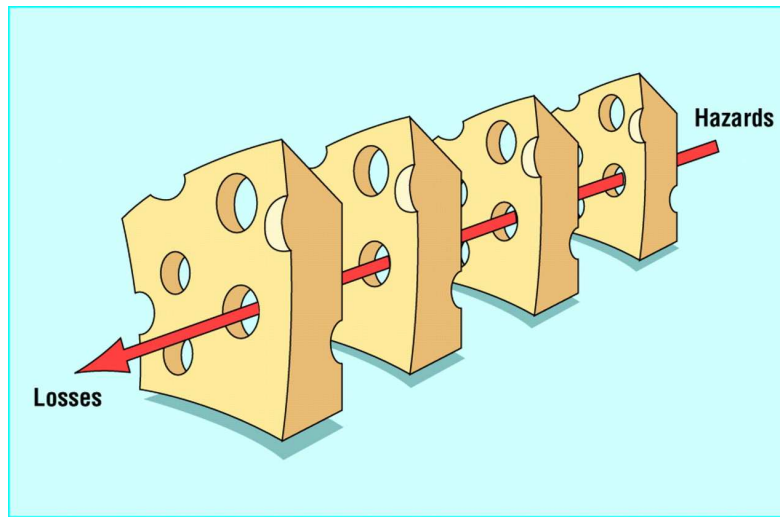


FIGURE 1.3 – Le modèle dit "Swiss cheese" illustrant comment les défenses, barrières et détrompeurs peuvent être traversés par la trajectoire des accidents.

prescription suite à l'inversion des échantillons sanguins de deux patients, ce qui peut impliquer des complications pour les deux malades qui recevront un traitement adapté à la pathologie de l'autre.

Une certitude peut être avancée, personne n'y gagne à voir un patient devenir plus malade que lorsqu'il est arrivé, que ce soit une conséquence iatrogène ou une infection nosocomiale. Une maladie est dite nosocomiale si elle a été contractée dans un établissement médical, que ce soit par un malade ou un professionnel de la santé. [Potocnjak-Vaillant \[2009\]](#) informe que les efforts effectués pour améliorer la qualité de soins ont réduit à 750 000 le nombre de personnes, soit un patient sur 20, contractant une infection nosocomiale, dont 4 000 en meurent. Face à l'apparition de plus en plus de bactéries multirésistantes, comme le staphylocoque doré, l'étude de [\[Cao and Sun 2009\]](#) permet d'espérer des peintures et textiles *biocides*, mais ces technologies naissantes sont loin d'être applicables à grande échelle. Certains indicateurs ont été spécialement créés afin de mesurer les risques nosocomiaux, quatre de ces indicateurs ont été sélectionnés afin d'établir un palmarès des établissements les plus sûrs de France. Nous les décrirons plus en détail dans la section 2.1.

[\[Castot et al. 2008\]](#) rapporte des résultats de l'étude EMIR (Effets indésirables des Médicaments : Incidence et Risque). On y apprend notamment qu'environ 3.6% des hospitalisations sont dues à un effet médicamenteux indésirable, dont 12,3% portent sur les prises d'anticoagulants de type antivitamine K. L'information concernant de mauvaises réactions à un type de médication incluse au DMP permettrait donc de réduire le nombre d'hospitalisations, ainsi que le nombre d'administrations de produits inadaptés pour le patient. Le parallèle entre ce chiffre et le rôle "prééminent" de ces anticoagulants dans l'hospitalisation pour incidents médicamenteux nous avertit du fait que de nombreux autres types de produits peuvent être à l'origine de complications et/ou d'hospitalisations.

Dans cette partie, nous avons évoqué certains risques et problèmes inhérents à l'organisa-

tion hospitalière, les directions que prennent les réformes la concernant. Parmi ces réformes, certaines comme la T2A ou la mise en place de Dossier Médical Personnel, une amélioration de la traçabilité semble un point important, elle sera de plus un atout pour réduire le risque d'incidents hospitaliers. La partie suivante s'attache à définir plus précisément ce concept de traçabilité ainsi que d'autres avantages envisageables *via* son amélioration.

### 1.1.5 Des besoins de traçabilité renforcés

[EuroPharmat 2007] décrit la traçabilité comme le fait d'associer systématiquement un flux d'information aux flux physiques, et reporte la définition donnée par la commission nationale de terminologie : "Ensemble des procédures et des contrôles permettant de suivre l'historique d'un produit depuis sa fabrication jusqu'à son administration à un patient. Aptitude à retrouver l'historique, l'utilisation ou la localisation d'une entité au moyen d'identifications enregistrées".

La traçabilité joue un rôle primordial dans l'aptitude à délivrer "le bon produit, au bon endroit, au bon moment, avec le bon dosage et au bon patient". Cette consigne de bonne pratique dérive de la définition du marchandisage de Keppner, rapportée dans [Prades 2008] et signifiant : "Right product, Right price, Right moment, Right place, Right quantities". Dévier de cette consigne de bonne pratique médicale peut avoir d'importantes conséquences, et si la traçabilité ne permet pas obligatoirement de s'assurer que ces cinq points sont respectés, elle permet de retrouver plus facilement les défaillances à l'origine des incidents et participe donc à l'amélioration systémique de la prodigation de soins.

Dès 2003, [British Department of Trade & Industry 2003] propose un recueil de cas d'usage performants visant à améliorer le traitement du patient, en réduisant les risques d'erreurs de médication. Ces pratiques et règles, dont certaines ont été proposées par la Food and Drug Administration (FDA) américaine, requièrent dans leur grande majorité l'utilisation de systèmes de transfert de l'information et d'identification fiables : codes barres, datamatrix, ou RFID, mais également la reconnaissance biométrique ou encore la reconnaissance de l'écriture donnant lieu à une informatisation immédiate des prescriptions. Ces recommandations sont des améliorations de la traçabilité visant à éviter des erreurs d'identification. D'autres suggestions, qui nécessitent un système d'identification et l'utilisation de TICs fiables pour être applicables, incluent la préparation automatisée de traitements ou l'utilisation de la téléométrie.

[2010; 2006] estiment que 29 milliards d'euros de produits médicaux sont contrefaits. Ces produits ont une efficacité souvent minime par rapport aux originaux, et peuvent parfois même s'avérer dangereux. Une traçabilité renforcée permettrait de largement réduire la quantité de ces produits, ou du moins éviter qu'ils ne soient revendus en officine par du personnel de bonne foi. Ces études mentionnent également les problèmes économiques induits par le "commerce gris", qui consiste en le rapatriement de médicaments de régions où leur coût est faible pour les revendre au prix fort. Une bonne traçabilité doit être associée de moyens technologiques d'identification des lots ou même d'identification unitaire, dont nous précisons les modalités dans la section 1.2.

Dans un registre plus général, [Gee et al. 2009] est une étude menée par le Réseau européen de lutte contre la fraude et la corruption dans les soins de santé (EHFCN) et le Centre pour les services de lutte contre les fraudes (CCFS) de l'université de Portsmouth, en Grande-Bretagne. Selon cette enquête, 5.59% des dépenses mondiales de santé sont perdues chaque année à cause



d'erreurs ou de faits de corruption. Ce qui représente selon [Gee et al. 2010] un total de 180 milliards d'euros, dont 36 en Europe. En France, la Caisse Nationale d'Assurance Maladie a repéré des fraudes à hauteur de 160 millions d'euros en 2008, loin d'atteindre la somme estimée de ces abus. Ces valeurs nous font également souligner l'importance de la traçabilité pour déceler ces pertes.

Nous avons évoqué dans la section précédente les problèmes liés à l'apparition d'infections nosocomiales. La lutte contre les infections nosocomiales nécessite donc un suivi des processus de stérilisation et de nettoyage de qualité. L'assurance du bon respect de ces pratiques doit être vérifiée, au travers de processus de traçabilité dédiés. Cela signifie un suivi de l'ensemble du matériel médical, afin de vérifier son passage en stérilisation, mais également une traçabilité des processus, afin de valider par exemple le fait qu'un lieu a été correctement stérilisé avant usage.

Un autre exemple, concernant les incidents iatrogènes, consiste en la validation du fait qu'un patient ne risque pas de mal réagir à un soin. Cela peut être opéré au travers d'analyses d'allergies ou de pathologies particulières. Ces exemples nous mènent à préciser le sens du terme entité dans la définition donnée au début de cette section. Le suivi des processus et activités nécessite d'appliquer la traçabilité aux entités physiques, comme que sont les dispositifs médicaux et les médicaments. Les entités actives que sont le personnel soignant ou les patients et leurs activités doivent également être suivies et mises en relation avec la position géographique, afin de savoir quelles actions ont été réalisées dans quel lieu. L'exemple de la stérilisation peut alors être approfondi : si le parcours d'un patient diagnostiqué d'une maladie contagieuse peut être retracé, les personnes risquant une contamination pourront être retrouvées facilement et leur chance de contracter la maladie amoindrie.

Dans cette première section introductive, nous avons décrit des particularités et difficultés propres aux systèmes de production de soins. Nous avons montré qu'il était important de pouvoir appliquer la traçabilité à tous types d'entité afin d'en améliorer la qualité de soins et la sécurité des patients et du personnel. La section suivante décrit les principaux outils de traçabilité utilisés actuellement, et notamment les outils d'identification automatisés que sont les RFID.

## 1.2 Les technologies d'identification

Le chapitre précédent décrit des sources de pertes pécuniaires et qualitatives des systèmes de production de soins. Nombre de ces imperfections de fonctionnement peuvent être réduites via une meilleure identification des biens et des personnes ainsi qu'un accès aux informations les concernant. Ce chapitre décrit les principales technologies d'identification disponibles à l'heure actuelle. Nous nous intéresserons plus particulièrement aux outils d'auto-identification que sont les RFID. Après une description de leur mode opératoire, elles seront comparées dans un contexte très général puis plus particulier, allant des chaînes logistiques / chaînes de production que suivent tout type de biens jusqu'au cas très particulier du traitement à domicile.

### 1.2.1 Les technologies d'identification

L'utilisation du *code barres* est une méthode d'identification aujourd'hui extrêmement répandue. L'histoire du code barres est rapportée dans l'"Historique du code barres" [[gomaro.ch 2006](#)]. Le fonctionnement consiste en la lecture d'un identifiant traduit en barres verticales. Il en existe de nombreux formats adaptés à divers usages, de l'identification de gros transporteurs à plusieurs dizaines de mètres à celui de tubes d'échantillons biologiques, en passant bien entendu par l'ensemble des produits de la grande distribution.

Les "*datamatrix*" sont l'équivalent de codes barres, mais en deux dimensions, voire en trois dimensions si on considère la coloration des points comme le propose [[Microsoft 2009](#)]. Cette technologie permet à une étiquette de contenir bien plus d'informations qu'un code barres. Le secteur pharmaceutique français s'est vu imposer l'obligation d'abandonner le code barres conventionnel afin d'utiliser des datamatrix contenant le numéro du lot de production et la date de péremption [[LegiFrance 2007](#)]. L'utilisation de cette technologie est devenue obligatoire pour les médicaments, et l'inclusion des données additionnelles permettent de mettre en place des détrompeurs et alertes rapides en cas de problème décelé de la qualité de lots de production, ou de vérification de la date de péremption des médicaments lors de leur utilisation. Un intérêt additionnel par rapport au code barres est que cette information est présente sur l'étiquette, certains appellent d'ailleurs des formes dérivées de datamatrix le "QR (Quick Response) code" car il permet d'accéder à des informations sans avoir à se connecter à une base de données mettant en relation le code d'identification aux informations concernant le produit. [[GS1 2009](#)] fournit une description précise des standards officiels d'édition des datamatrix (taille, informations obligatoires, zones des informations...).

RFID est l'acronyme pour "*Radio Frequency Identification (Devices)*". L'idée derrière ces technologies peut être décrite comme un mélange entre le radar et la radio. Le premier dispositif pouvant être considéré comme RFID est le système d'"identification, friend or foe", utilisé afin de reconnaître l'appartenance d'avions de chasse dans les années 1940 grâce à des transpondeurs à longue portée. L'une des premières publications scientifiques concernant les RFID serait [[Stockman 1948](#)], d'après l'"Histoire des RFID" [[Landt and Catlin 2001](#)]. L'auteur y écrit qu'une part considérable de travaux restent à effectuer afin de résoudre les problèmes des communications par énergie réflétrie, et avant que le champ d'applications utiles ne soient exploré. Les étiquettes communicantes sont aujourd'hui une réalité, mais il semble que des utilisations de ces technologies n'ont pas encore toutes été explorées ni toutes les contraintes et difficultés

techniques résolues.

Ces "transpondeurs", aussi appelés "étiquettes intelligentes" (pour "*smart tags*"), ou plus brièvement "*tags*" (traduction en anglais d'étiquette, badge, macaron, ...). Ils peuvent dans leur forme la plus banale être décrits comme des codes barres invisibles mais lisibles. Ils ont l'avantage de contenir un code leur étant propre, que ce soit l'identifiant retourné lors de leur lecture ou un code unique, déposé physiquement par le fabricant qui a encodé le tag avec le code produit électronique : l'Electronic Product Code (EPC). L'EPC contient les informations concernant le produit suivant la norme proposée par <http://www.gs1.org/epcglobal>. Ce code contient une en-tête, déterminant la norme suivant laquelle il est encodé, puis la désignation de l'entreprise et du type de produit dont il s'agit ; il contient ensuite un champ qui concerne le produit en particulier. Ils peuvent contenir une grande quantité d'informations (plusieurs kilo octets) avec la possibilité de les modifier pour y ajouter ou retirer des informations, voire de les connecter directement à des dispositifs, comme des capteurs spécifiques aux usages pour en lire l'état ou contrôler des dispositifs médicaux [Bacheldor 2006] [Abad et al. 2009]. Certains ont même la possibilité de communiquer entre eux, sans passer par des lecteurs intermédiaires.

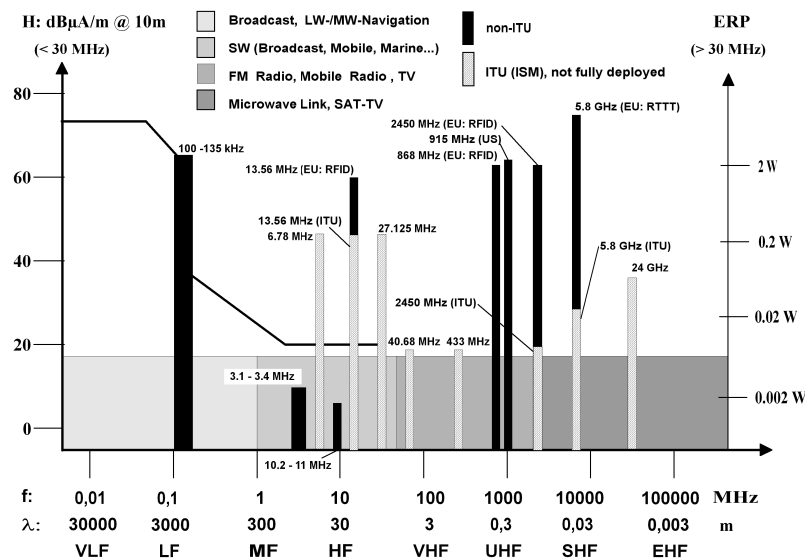


FIGURE 1.4 – Gamme de fréquences, puissance et force du champ utilisés pour les RFID. (Issue de *RFID-Handbook*)

Le terme RFID englobe ainsi de nombreuses technologies sans fil et protocoles (LF, SHF, zigBee, NFC, ...). On peut d'abord différencier ces technologies suivant leur gamme de fréquence (figure 1.4). Les plus hautes fréquences connaissent généralement des distances de communication plus élevées. Une autre différenciation se fait entre les tags dits passifs et actifs. Certains prendront le raccourci de dire que les tags passifs ne comportent pas de batterie, contrairement aux tags actifs. Cette définition oublie les "Battery Assisted Passive tags", ou tags semi-passifs. Ces transpondeurs semi-passifs comportent une batterie, utilisée pour alimenter leur circuit interne, avoir de meilleures performances (notamment la distance de lecture), ou

alimenter un circuit leur étant attaché (capteurs, circuit de cryptographie, ...). Le fait est qu'ils ne génèrent pas d'ondes à proprement parler, ils utilisent le champ émis par le lecteur pour communiquer [EPCGlobalInc 2007]. Les tags actifs sont eux capables d'émettre des ondes radio sans qu'un lecteur ne soit à proximité, on les différenciera des autres car ils comportent une source d'émission d'ondes radio leur étant propre. Certaines de ces puces communiqueront qu'après avoir été sollicitées alors que d'autres essaieront d'amorcer une communication avec une certaine période. Il existe des puces sur lesquelles il est impossible d'écrire des informations, une seule fois (Write Once Read Many) ou bien de disposer d'une mémoire réinscriptible. Une classification existe, initialement conçue par l'Auto-ID Center, qui permet de différencier les types d'étiquettes RFID. Leur appartenance à une classe dépend de l'interface de communication, de la mémoire qu'elles contiennent, des possibilités d'écriture, de la fréquence utilisée et des protocoles de sécurité dont elles disposent [Kleist et al. 2005].

Outre le fait de ne pas nécessiter de visée optique pour lire ces étiquettes, des techniques d'anticollision permettent de rapidement accéder au contenu de plusieurs d'entre elles en très peu de temps. Il est ainsi possible d'inventorier des stocks très rapidement et donc plus souvent [K.H. et al. 2006]. On appellera "*objets communicants*" ou "*objets intelligents*" tous les *objets* auxquels on a apposé un tag, le rendant communicant.

Le jargon des concepteurs / revendeurs de solutions RFID comporte l'anglicisme "tagger", qui correspond, comme nous l'indique la définition de son homonyme, au fait d'apposer des tags, à cela près que le tag n'a ici plus son sens de graffiti mais celui d'une étiquette intelligente.

L'apparition d'un nouveau standard, appelé "EPC Gen2", peut laisser espérer que les solutions développées à partir d'aujourd'hui seront interopérables et que les formats propriétaires ne seront plus déployées que dans des systèmes conçus pour rester fermés, ou du moins que les acheteurs seront conscients des possibles désagréments encourus par ce choix.

Dans un article intitulé "Intelligent Products : A survey", Meyer et al. [2009] ont classifié les objets intelligents en distinguant leur niveau d'intelligence, sa localisation et son agrégation (si la solution étudiée concerne une entité ou une composition d'entité). D'après ses définitions, représentées graphiquement figure 1.5, les niveaux d'intelligence sont, par ordre croissant, le fait de contenir de l'information, de notifier des problèmes et de prendre des décisions sans contrôles externes. La localisation de l'intelligence peut être située sur l'objet ou se trouver à travers le réseau. Le niveau d'agrégation de l'intelligence différencie les cas où les objets sont étiquetés à l'unité et si les conteneurs (différents niveaux d'unité logistique) le sont. L'agrégation concerne la capacité qu'ont les objets à communiquer entre eux, et l'aptitude d'un conteneur à communiquer avec et à propos de ce qu'il contient. Nous utiliserons cette classification pour qualifier les projets étudiés lors de leur présentation (Section 1.3).

Si on cherche à comparer les outils d'identification présentés dans cette section au travers de cette classification, un avantage indéniable sera attribué aux technologies de communication sans contact. La section suivante s'applique à décrire l'état du déploiement de ces technologies ; nous préciserons ensuite les apports attendus au travers de leur mise en place et décrirons quelques cas pratiques dans un contexte général puis pour le cas plus particulier de la production de soins.

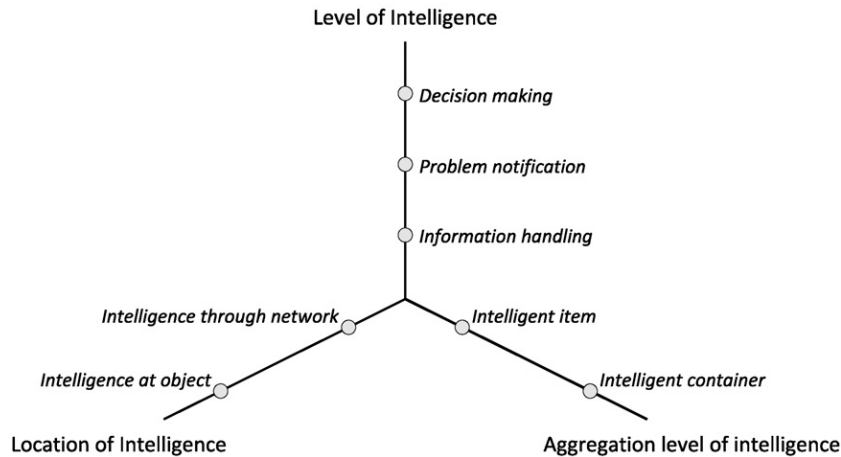


FIGURE 1.5 – Classification des systèmes de produits intelligents \_ [Meyer et al. 2009]

## 1.2.2 La diffusion des technologies et des RFID

IDTechEx est une compagnie indépendante spécialisée dans la collecte de retours d'expérience et d'estimation de l'évolution de nouvelles technologies (RFID, électronique imprimée, véhicules électriques). Elle estime que 2.35 milliards de tags seront vendus en 2010, contre 1.97 en 2009. Ces données ont été revues à la hausse par rapport à celles de 2005, qui estimaient que la barre des deux milliards ne serait atteinte qu'entre 2011 et 2016 [van Lieshout et al. 2007]. Le marché des lecteurs est supposé croître de 440% en dix ans. Concernant plus précisément le monde de la Santé, la base de données d'IdTechEx contenait 217 études de cas en Octobre 2009, elle en contient 399 en Juillet 2010, preuve de la forte augmentation de l'utilisation des technologies auto-communicantes dans le milieu de la Santé.

### 1.2.2.1 La diffusion de technologies

La courbe de maturité des technologies, ou "*Hype Cycle for Emerging Technologies*" apparaît en 1995, dans un rapport de recherche publié par Jackie Fenn [Fenn and Raskino 2008]. C'est une description des étapes subies par les nouvelles technologies mise en relation avec leur visibilité, ou de l'intérêt qu'elle suscite auprès des médias et industriels, sous forme d'une courbe. Cette description est issue de plusieurs observations similaires concernant l'évolution de certaines technologies émergentes. Elle est composée de cinq phases successives que sont :

Technology trigger : déclencheur initial, lancement d'un produit ou démonstration publique

médiatisée ;

Peak of inflated expectations : phase d'engouement rapide, de projections qui s'avèreront parfois irréalisables par rapport au potentiel réel de la technologie ;

Trough of disillusionment : phase de désillusions, due à la problématique d'adaptation de la technologie au contexte de son application ;

Slope of enlightenment : parcours de la maturation technologique ;

Plateau of productivity : état stable de l'utilisation de la technologie, dernières générations comprises.

Un rapport annuel basé sur cette courbe est proposé par Gartner™ depuis 2004. La version 2008 (figure 1.7) positionne l'utilisation des RFID pour le suivi des palettes très proche du pire niveau de leur visibilité, en plein dans le "creux des désillusions". C'est également le cas dans la version 2010. Cette approche considère que chaque technologie dispose de sa propre échelle de temps.

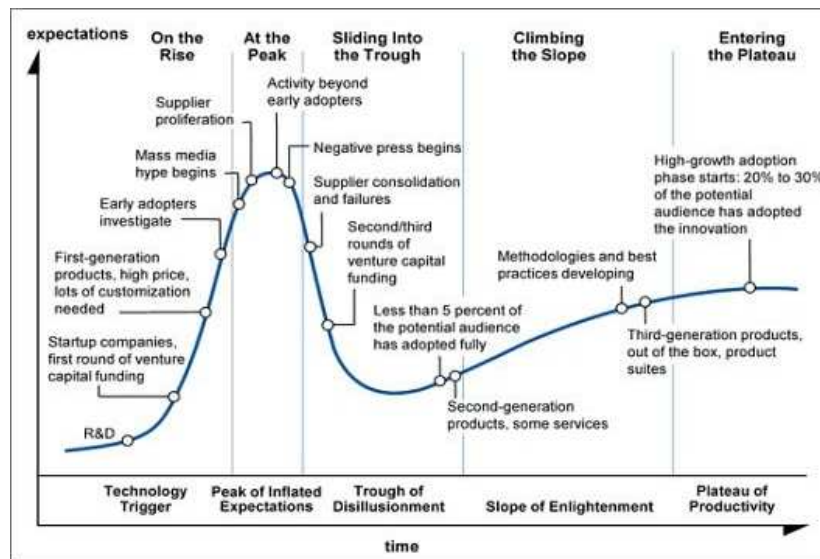


FIGURE 1.6 – Description du "Hype Cycle of technologies" [Fenn and Raskino 2008]

La figure 1.6 est une explication des étapes de la courbe de maturation des technologies de Gartner. Elle permet de mettre celle-ci en relation avec le modèle de [Bass 1969]. On observe en effet que les technologies sont très peu adoptées (moins de 5% du potentiel) à la fin de la "phase de désillusions", alors que la seconde génération des produits apparaît. Leur diffusion devrait donc fortement augmenter par la suite.

Au delà de l'intérêt porté envers une technologie, Rogers [1962] présente une description qui concerne leur diffusion sous forme de courbes (Fig. 1.8). La diffusion est le processus au travers duquel une innovation est communiquée aux membres d'un système social. D'après ces prévisions, nous devrions nous situer à l'aube d'une véritable maturation des technologies RFID. Bien qu'elles soient utilisées au quotidien par de nombreuses personnes, ces technologies ont un potentiel très important. Leur appropriation par les particuliers, le développement d'applications personnelles, l'émergence de l'Internet des Objets pourraient en faire plus qu'un remplaçant du code à barres.



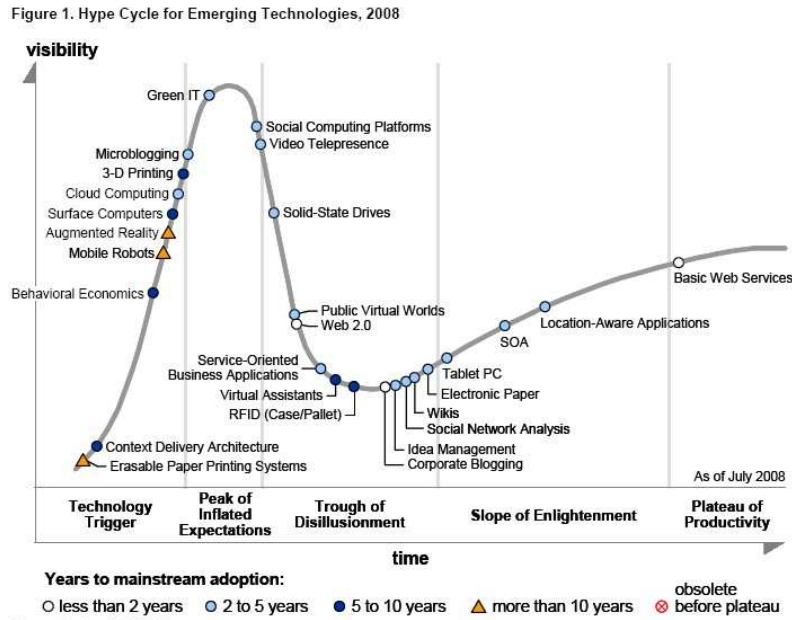


FIGURE 1.7 – Courbe de maturité des nouvelles technologies, Gartner, Juillet 2008

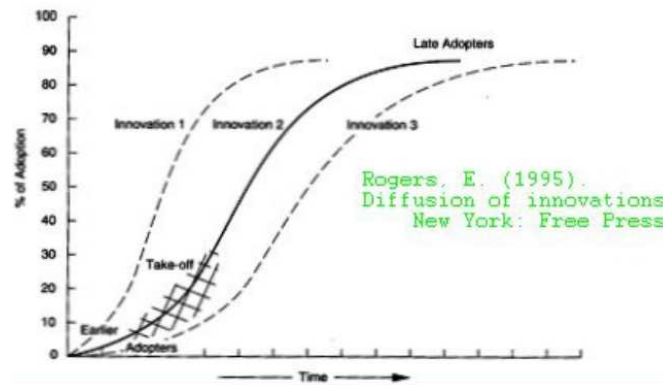


FIGURE 1.8 – Courbe de Rogers sur l'adoption cumulative "en S" des nouvelles technologies

L'observation des figures 1.9 et 1.10, ainsi que les observations effectuées dans Bass [1969] confirment et expliquent en partie la fameuse courbe de diffusion de l'innovation décrite par Rogers [1962]. Sur la figure 1.9, la majorité des technologies ont suivi une courbe d'adoption "en S"; c'est le cas de la radio, la télévision, le micro-ondes, le VCR (magnétoscope), le téléphone portable ou l'internet. Parmi les technologies récentes, seul le PC échappe à cette règle. Les technologies inventées il y a 80 ans ou plus ne suivent pas la courbe d'adoption ; rappelons que d'importants événements ont eu lieu au cours du siècle dernier, notamment la crise économique de 1929, suivie de la seconde guerre mondiale. On voit plus clairement l'impact de ces

événements sur les courbes reportées figure 1.10, son abscisse correspondant aux dates et non à l'âge des technologies. Par exemple, la diminution du nombre de foyers américains possédant le téléphone ou une voiture au début des années 30 est particulièrement flagrante.

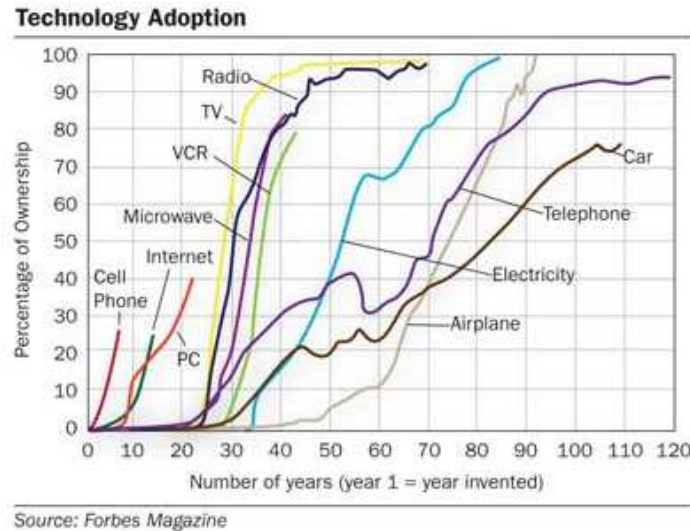


FIGURE 1.9 – Courbes des temps d'adoption aux technologies maintenant "courantes"

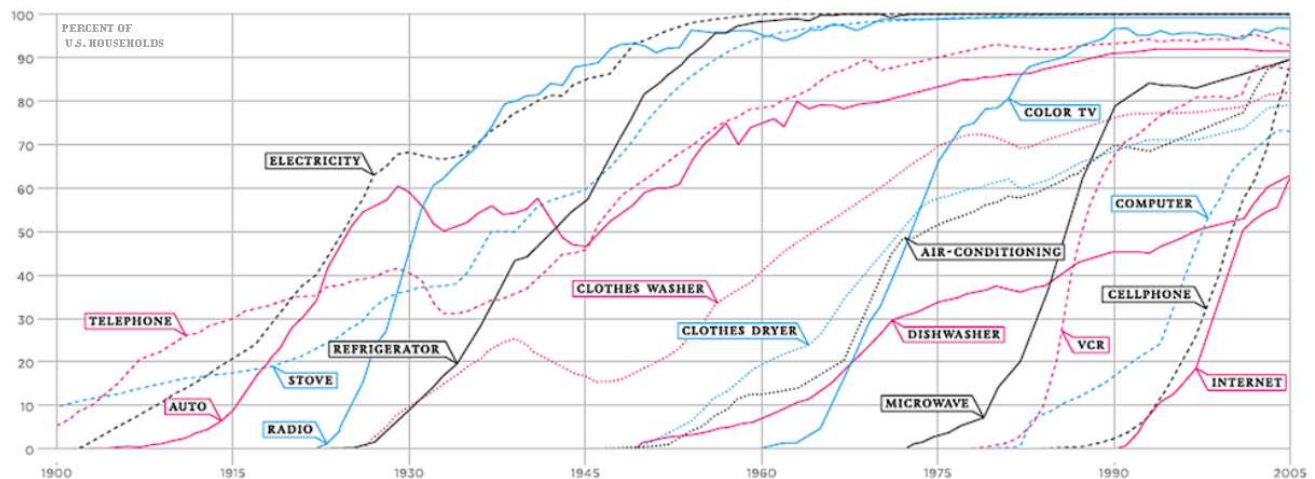


FIGURE 1.10 – Courbes de diffusion des technologies aux Etats-Unis. (source New York Times)

À un niveau plus académique, Bass [1969] a cherché à modéliser l'évolution des ventes en se basant sur le fait que leur nombre à un instant  $t$  dépendait du nombre à l'instant  $t - 1$ , les courbes cumulatives de prévision obtenues auront un aspect similaire à [Rogers 1962]. Plus d'informations et de précisions sont disponibles dans la revue de littérature de Meade and Islam [2006].

[Namatame et al. 2009] est une étude récente traitant de la dynamique de diffusion de nouveaux produits. La diffusion est un processus au travers duquel de nouveaux produits (nouvelles



technologies) et pratiques sont introduites dans la société. Sans renier les modèles d'adoption existants, les auteurs insistent sur les interactions entre une innovation et les améliorations dans leur utilité, apportées par les utilisateurs.

[Hall 2004] considère dans son modèle plus d'informations donc plus d'hésitations et de temps pour réfléchir avant de réaliser l'achat. Cette étude considère que les consommateurs sont homogènes, ce qui d'après Namatame et al. [2009] n'est pas adapté aux processus de diffusion dont l'aspect émergent est complexe.

[Young 2007] incorpore de l'hétérogénéité dans la manière de modéliser les consommateurs, il inclut la contagion, l'influence sociale et l'apprentissage social. Cette adaptation du modèle de Bass implique que la probabilité qu'un individu adopte une technologie dépend du nombre de ses voisins à l'avoir.

[Spielman 2005] définit un système de diffusion de l'innovation tel un réseau d'agents, ainsi que d'institutions, organisations et politiques qui conditionnent leur comportement et performance suivant la génération, l'échange et l'utilisation du savoir. De fait, l'adoption d'une innovation par un agent peut avoir des effets positifs ou négatifs sur les autres agents au travers du réseau social. Le fait est que la diffusion s'effectuera souvent de manière fortuite et imprévisible [Berdegué 2005].

De manière générale, Rosenberg [1972] observe que dans l'histoire de la diffusion de nombreuses innovations, on ne peut qu'être coincé entre deux caractéristiques du processus de diffusion : son apparente lenteur générale d'un côté, et l'importance des variations de l'acceptation de différentes inventions de l'autre. De nombreux modèles visant à évaluer la rapidité d'adoption de technologies émergentes ont été développés, mais aucun n'a pu intégrer l'ensemble des paramètres nécessaires à une modélisation de ce phénomène assez précise pour l'anticiper précisément.

### 1.2.2.2 Le cas des RFID

Concernant le cas particulier des RFID, [Wang et al. 2010] est une étude basée sur des données relevées dans un ensemble d'industriels afin de mieux identifier les éléments impactant la (non) adoption des technologies RFID. Les observations rapportées visent à mesurer à quel point les facteurs ayant un effet sur la décision de migrer vers un système RFID sont importants. Ces facteurs sont :

1. Le fait qu'elles apportent un avantage par rapport aux autres technologies ;
2. Leur complexité perçue de leur compréhension et de leur utilisation ;
3. La compatibilité avec le système et le fonctionnement existant ;
4. L'approche managériale ;
5. La taille de l'entreprise ;
6. Les compétences technologiques présentes dans l'entreprise ;
7. La pression compétitive ;
8. La pression des partenaires (clients ou fournisseurs) ;
9. L'intensité et l'importance de l'information relative aux produits.

Parmi ceux-ci, les auteurs ont observé que (1), (4) et (6) n'avaient pas d'importance significative, et que (9) avait le poids le plus important, et qu'il était un inhibiteur à l'adoption des RFID, contrairement à l'hypothèse émise. Les conditions de l'expérimentation ne permettent toutefois pas de généraliser ces résultats.

Le niveau d'avancement du déploiement des technologies RFID est à la fois assez avancé pour que certains apports dus à son utilisation soient clairement définis, et d'ailleurs repris par l'ensemble des fournisseurs de matériel et de solutions.

Cette maturation est accompagnée d'évolutions des usages et d'améliorations technologiques. L'augmentation de la demande provoque, à performance équivalents, une réduction du coût d'achat. Les principales améliorations prévues de ces technologies sont :

- La réduction des contraintes, comme les tags RFID adaptés aux objets métalliques [Lafitte 2010] sans conditionnement spécifique surélevant la puce ;
- L'émergence de la RFID imprimée par jet d'encre conductrices [Lakafosis et al. 2010] ;
- L'utilisation du graphène, du graphane ou du molybdène MoS<sub>2</sub> ([Sacco 2011] à propos de [Radisavljevic et al. 2011]), qui pourraient remplacer le silicium afin d'améliorer les performances des circuits électroniques ;
- le développement de dispositifs destinés aux particuliers, dont l'appropriation de technologies présage l'apparition de solutions et d'usages innovants ;
- L'amélioration des techniques de transfert d'énergie et leur application aux étiquettes intelligentes [Jingun et al. 2010].

L'émergence d'autres technologies connexes, interagissant avec les RFID, est également un facteur potentiel d'une facilitation de leur diffusion. L'émergence de la robotique domestique peut être un facteur important de la généralisation de l'étiquetage intelligent des produits unitairement.

Pour en rester au cas existant des RFID, rappelons que leur utilisation peut mener à des réorganisations et à la mise en place de nouvelles activités toutes deux spécifiques au système auquel elles sont introduites. C'est peut-être là l'une des raisons pour lesquelles le déploiement de ces technologies semble difficile, avec le fait que leur apport maximal n'est principalement observé que lorsque chaque acteur du cycle de vie des produits s'est adapté à leur utilisation. Il est également montré que ces technologies sont mal perçues par le grand public.

Draetta and Delanoë [2011] ont fait une étude sociologique qui traite des risques perçus par la société face aux technologies auto-communicantes. . Y sont mis en perspective quatre types de risques :

Le risque économique : Différents points de vue sont à considérer à propos de cet indicateur. La majorité des études prévisionnelles concernant une éventuelle utilisation de technologies RFID dans le domaine de la chaîne logistique (production et distribution) cherchent à en estimer les apports financiers. L'indicateur souvent retenu est d'ailleurs très parlant puisque le retour sur investissement est un aspect totalement pécuniaire. Même si des paramètres venant influencer sur cet indicateur incluent des aspects socio-psychologiques, les préceptes modélisés ont une orientation purement marketing. D'un point de vue plus macroscopique, le risque économique serait idéalement lié au risque socioprofessionnel. La difficulté de prédire les impacts est grande, chaque innovation ayant un potentiel d'automatisation comportant à la fois le risque de réduire l'offre de

travail dans les secteurs visés par l'automatisation et un besoin de main d'œuvre pour sa conception et son exploitation.

Le risque socio-professionnel : Un enjeu de société important porte sur la valorisation des métiers dont l'activité principale sera automatisée par les technologies, dont les RFID. L'impact d'une importante automatisation des processus de production sur l'emploi peut être important, ce qui pourra finalement mener à une baisse de la consommation et un ralentissement global de l'économie.

Le risque d'atteinte à la vie privée : [Greenleaf \[2010\]](#) décrit l'approche adoptée par l'Inde pour la mise en place de leur système d'identification national. Les critiques quant à ce système y sont nombreuses. Les projets décrits ne mentionnent pas l'utilisation de technologies d'auto-identification mais cet article illustre bien que c'est dans la définition du système d'identification, des possibles utilisations d'un identifiant unique et des interconnexions entre les bases de données que se joue la conservation d'un certain niveau de privauté. Concernant le cas particulier des RFID implantées dans le corps humains, rappelons l'opinion donnée par l'"*European Group on Ethics in Science and New Technologies to the European Commission*" [[EGE 2002](#)]. Celui-ci rappelle avant tout que tout ce qui est techniquement possible n'est pas forcément admissible d'un point de vue éthique, socialement acceptable ni approuvé légalement. Certains états américains ont d'ailleurs récemment interdit l'obligation d'implants RFID pour les humains. Le traçage RFID deviendra obligatoire pour les animaux de compagnie carnivores voyageant en Europe à partir de Juillet 2011 [[Parlement Européen 2008](#)], et certaines applications commerciales existent déjà concernant les humains [[ContractorUK 2005](#)] [[VeriChip 2006](#)]. Les RFID sont considérées par certains comme des puces espionnes [[Albrecht and McIntyre 2006](#)], comme un outil liberticide de contrôle des masses. Presque paradoxalement, l'étude [[Katz and Rice 2009](#)] tend à montrer que les patients sont rarement opposés à l'utilisation des technologies dans l'hôpital. Cela peut s'expliquer par le fait que les patients sont conscients qu'une mauvaise traçabilité peut mener à des effets iatrogènes et indésirables, et que l'exposition de sa vie privée au sein d'un hôpital peut paraître moins risquée. L'informatisation des données peut sur ce point particulier être protecteur des informations personnelles, lorsqu'on le compare à la présence d'une fiche de diagnostic ou de prescription au pied du lit notamment.

Le risque sanitaire : [[Hohberger and Tsirlin 2009](#)] montre que les RFID HF n'ont pas d'effets à long terme sur les globules rouges. [Arumugam and Engels \[2009\]](#) observent toutefois que des technologies UHF peuvent provoquer un taux d'absorption des ondes supérieure à ce que recommande la Federal Communications Commission. Il semble important d'effectuer des mesures incluant un "effet cocktail" relatif aux nombreux types d'ondes auxquelles les personnes et produits sensibles peuvent être exposés. [Togt et al. \[2008\]](#) et [Kapa et al. \[2011\]](#) ont observé que certaines configurations matérielles étaient incompatibles avec certains types de RFID, les interférences pouvant provoquer des dysfonctionnements du matériel existant.

Le principal risque perçu est le risque d'atteinte à la privauté. Le fait que les us et coutumes des sociétés peuvent être très différentes, notamment au regard de l'exposition de sa vie privée, implique que la réticence d'une société envers ces technologies n'est pas forcément partagée par tous. Il sera toutefois difficile de calquer les possibilités d'un système d'identification mondial

au plus bas niveau car certains verraient cela comme un veto technique leur interdisant d'utiliser leur identifiant comme bon leur semble ; et le fait inverse que certaines sociétés refuseraient que leur privauté ne soit mise en danger au travers d'une traçabilité automatique trop importante. La récente explosion des réseaux sociaux et de leur contenu, malgré leurs politiques commerciales, font que les atteintes à la privauté les plus importantes dans la société occidentale sont portées par les utilisateurs eux-mêmes. Ces sujets ne sont pas le sujet principal de cette thèse mais il est important de les mentionner dans le cadre d'une étude portant sur la mise en place de technologies de traçabilité.

La section suivante décrit les apports généralement attendus à l'égard des technologies RFID, principalement dans la chaîne logistique.

### 1.2.3 Les RFID dans la chaîne logistique

Les attentes relatives à l'utilisation des RFID dans la chaîne logistique sont nombreuses. L'utilisation la plus connue de ce type de technologie est l'alarme antivol en grandes surfaces. Bien que l'identification unitaire ne joue dans ce cas aucun rôle, l'absence de besoin de ligne de mire fait que le passage d'un tag dans un portique détecteur implique le déclenchement d'une alarme. Une autre application des RFID en tant que mécanisme anti-fraude est son utilisation pour lutter contre la contrefaçon. Des applications existent au niveau de vêtements, de produits AOC, de graines génétiquement modifiées ou encore de médicaments. Leur capacité de mémoire peut permettre d'identifier unitairement chaque produit, utilisant éventuellement le code EAN-UCC128, qui inclut un identifiant unique (UID), contrairement aux codes barres ou même aux datamatrix, qui ne peuvent au mieux contenir qu'un numéro de lot et qui sont plus aisément falsifiables car uniquement imprimés.

[Stratégie Logistique 2007] rapporte que pour "87% des personnes interrogées (directeurs de la grande distribution), les principaux avantages attendus de la RFID sont le meilleur suivi/contrôle des inventaires et un niveau de sécurité amélioré ; 65% d'entre elles visent la gestion des promotions ; 58% privilégient les réapprovisionnements plus rapides et plus efficaces ; enfin, 40% estiment que la RFID les aiderait à résoudre les problèmes liés à la garantie et au retour des produits". Ces proportions sont dues à la vision que peuvent avoir différents décideurs et des particularités contextuelles dans lesquelles ils exercent.

[Angeles 2005] décrit des études de cas de leur utilisation dans différentes chaînes logistiques et de production pour la distribution et le transport, le suivi de palettes (en boucle fermée), de documents légaux, de produits périssables, de conteneurs ou encore de la configuration d'automates d'assemblage automobile. Son étude pointe bien les questions que doivent se poser les chefs de projet RFID :

- Quelle technologie choisir ?
- Quels problèmes techniques pourraient apparaître dans l'environnement ?
- De quelles informations a-t-on besoin et où les stocker ?
- Les bases de données, logiciels et informations envoyées aux collaborateurs supportent-ils le temps réel ?
- Comment calculer le retour sur investissement ?

Cette question du retour sur investissement (ROI) intéresse particulièrement les industriels. Le ROI est une estimation du temps nécessaire pour rentabiliser l'investissement. Ce calcul financier compare les coûts d'installation et d'exploitation avec les gains apportés par la technologie mise en place. Cet indicateur nécessitera d'être repensée dans notre cas : le monde hospitalier. Plusieurs études se sont penchées sur une anticipation du ROI dans différents contextes. Les apports directs de l'utilisation de RFID peuvent permettre de modifier certaines activités en profondeur. La modification de la politique de rangement et de réapprovisionnement d'un stock, rendue possible par des gains de temps d'exécution et de précision des inventaires [Lee et al. 2004], est particulièrement intéressante et son impact au niveau du ROI important. Au regard de la difficulté d'anticiper l'étendue complète des bénéfices relatifs à l'utilisation des RFID, à cause de possibles réorganisations et nouvelles activités notamment, [Leung et al. 2006] affirme par ailleurs qu'il est nécessaire de coordonner différents types d'outils d'aide à la décision.

Les améliorations au niveau de la performance de la chaîne logistique les plus évidentes sont la réduction du temps d'acquisition de l'information et sa précision. Que ce soit au moment de la vérification d'un colis prêt à être envoyé, sa réception ou l'inventaire d'un entrepôt, détenir l'information exacte est laborieux, et les écarts entre le niveau de stock réel et celui estimé par le système d'information peut aboutir à des ruptures de stock. Concernant ces problèmes d'approvisionnement et de gestion du stock, [Sternan 1989] propose d'utiliser le *jeu de la bière*, qui est une mise en situation pédagogique visant à montrer ce qu'est le *bullwhip effect*. Ce terme est employé pour décrire le fait que le temps mis par une information pour remonter la chaîne d'approvisionnement du distributeur final jusqu'au producteur a un effet amplificateur qui peut mener à une augmentation de la demande à l'origine de la chaîne (disons le fournisseur de matières premières) disproportionnée par rapport à l'augmentation de la demande des consommateurs.

Chen et al. [2000] montrent que la centralisation des informations relatives à la demande permet de réduire considérablement cet effet. Le partage des données en temps réel permet d'améliorer la performance des chaînes d'approvisionnement. L'acquisition et le partage d'informations en temps réel sont un point essentiel pour l'amélioration de la performance des chaînes logistiques rendue possible par les TICs modernes. L'utilisation d'objets communicants permet une information en temps réel qui permet d'accélérer la mise à jour des bases de données et donc d'améliorer la visibilité, liée à la performance des chaînes d'approvisionnement.

Dans la continuité de ce partage d'informations, Gaukler [2005] pose la question du partage du coût de l'application des tags à l'unité entre le producteur et le distributeur d'un produit. Il propose un modèle de répartition du prix des tags, dans le cas où les acteurs prennent des décisions locales et le revendeur est leader. Il en ressort que son modèle devrait prendre en compte d'autres incidences de ruptures de stocks, comme la perte d'une partie de la clientèle d'un producteur. Cette supposition est renforcée par le fait que les pertes indirectes sont estimées 30 fois plus importantes que les pertes directes [Kang and Koh 2002].

L'utilisation de technologies d'auto-identification permet d'obtenir en temps réel des informations relatives à l'ensemble des produits et/ou ressources. Cela permettra donc, en utilisant ces données au mieux, d'améliorer la collaboration entre les différentes entités de la chaîne logistique ainsi qu'au sein d'un maillon de celle-ci.

Rekik [2006] s'intéresse aux erreurs d'inventaires provenant du fonctionnement au sein d'un

magasin, comme le déplacement d'un produit par les clients ou une mise en rayon à un mauvais emplacement. Ils comparent le cas où le manager fera ses commandes sachant que son stock réel n'est pas celui indiqué par son système d'informations au cas où il détient l'information grâce à l'utilisation d'un système RFID. L'amélioration de la qualité de l'information rend les technologies d'auto-identification rentables. [Sahin et al. \[2008\]](#) étudient également les impacts d'inexactitudes d'un système d'informations, notamment au niveau de l'acquisition des données. Ils incluent des coûts associés au stock restant en fin de saison, aux ventes rejetées pour cause de rupture de stock connues et aux ventes initialement acceptées mais finalement impossibles à cause d'un écart entre le stock réel et le stock supposé par le système d'informations. Le modèle proposé permet d'évaluer l'importance de la justesse des données.

[\[Saraç et al. 2010\]](#) est un récent état de l'art complet des études traitant de l'utilisation des RFID dans la chaîne logistique et de l'estimation de ses impacts. Les auteurs y observent que la plupart des études (analytiques et par simulation) se limitent à une chaîne logistique très restreinte (un produit, un revendeur, un producteur, etc.). [\[Saraç 2009\]](#) propose par ailleurs un ensemble de résultats concernant l'utilisation de technologies RFID appliquées à des chaînes logistiques à 3 niveaux incluant des aléas inhérents aux clients, comparant plusieurs classes de produits et intégrant des comportements particuliers au niveau de l'approvisionnement et des clients finaux. Les modèles, configurables, et résultats décrits permettent de définir des classes de produits pour lesquels des coûts d'investissements sont intéressants à différents horizons de temps.

La mise en place d'un système RFID est une tâche complexe de part sa nature. L'apport en quantité et qualité d'informations requiert l'implication de nombreux acteurs pour en tirer un maximum de bénéfices. [Bottani et al. \[2009\]](#) propose une approche pour la conduite de projets de mise en place de solutions RFID. Cette "approche" est en fait un ensemble de recommandations flexibles qu'il faut adapter à la situation étudiée. [Leung et al. \[2006\]](#) recommandent quant à eux, dans le cas général des chaînes logistiques, de d'abord remplacer les codes barres par les RFID, puis de redessiner les processus afin de bénéficier des avantages que ces technologies peuvent apporter.

De nombreux exemples d'utilisation des RFID peuvent être trouvés sur l'internet. Il est cependant nécessaire de rester prudents à l'égard d'effets d'annonces, publicitaires ou autres "ballons d'essai" visant à pressentir l'opinion du public. Des organismes de presse spécialisée comme RFID Journal, FilRFID, ou encore Coexel permettent d'obtenir une grande quantité d'articles de presse et de se faire une idée de l'étendue des possibilités actuelles et à venir concernant ces technologies.

Un exemple intéressant concerne la vérification des conditions de transport et de la non-péréemption de consommables comme les glaces [\[discoverRFID 2010\]](#), le poisson, avec l'intérêt de capteurs d'humidité, et autres surgelés [\[Abad et al. 2009\]](#) ou encore la viande [\[Burnell 2008\]](#). Le respect de la chaîne de froid est très important, depuis la fabrication jusqu'à la consommation, en passant par d'éventuelles périodes de stockage. Au delà des aspects de sécurisation de la chaîne du froid, qui peut altérer la qualité des produits et mettre en danger le consommateur, il est intéressant de noter qu'un caractère informatif peut être apporté [\[Wessel 2008\]](#). Le temps





FIGURE 1.11 – Illustration du risque d'inefficacité d'un détrompeur

gagné au travers de cette application particulière est difficilement pondérable car il consiste en un temps de recherche d'un produit. Le fait de tagger des produits à l'unité peut donc également être un argument commercial, qui sera d'autant plus important si des systèmes RFID domestiques se développent. En tant qu'argument commercial, cet apport est très difficilement quantifiable.

Concernant l'utilisation de technologies RFID dans la vérification des procédures et des conformités, il est important d'observer la manière dont sont mis en place les détrompeurs. Qu'ils soient implémentés au niveau du suivi des processus de production, de la préparation de commandes, de la livraison, ou dans un contexte comme l'administration d'une médication, il est important de se préoccuper de leur efficacité. La mise en place d'alertes et détrompeurs n'est effectivement pas forcément efficace à 100%, et la détection d'incidents ou de situations à risque reste inutile si l'alerte n'est pas observée. L'image (1.11) est à ce sujet très parlante, et nombreux sont ceux ne décelant pas la dangerosité de la situation en cours de réalisation. Des études comme [Lacherez et al. 2007] proposent justement d'améliorer l'efficacité de certaines alarmes sonores en utilisant des mélodies plutôt que des "bips" qui saturent déjà l'espace sonore de certains services hospitaliers. L'intérêt de cette proposition réside dans le fait que les mélodies peuvent correspondre à différents types d'indicateurs. Le facteur d'urgence pourrait ainsi être observé plus rapidement. L'étude [Wee and Sanderson 2008] montre également que la reconnaissance des types d'alarme n'atteint pas une performance de 100%, et que la phase d'apprentissage observée n'est finalement pas très effective. Ceci peut être expliqué par le fait que les mélodies ont été choisies pour que leur signification soit intuitivement reconnue.

Le retour d'expérience [Holmqvist and Stefansson 2006], reporte une grande fiabilité des puces, mesurant que la majorité des erreurs de fonctionnement proviennent de l'application as-

sociée, avec 22 erreurs observées, suite à quoi viennent les erreurs provenant des opérateurs du réseau (7 erreurs), des dispositifs mobiles (3 erreurs), des serveurs (2 erreurs) puis des tags RFID, avec un seul problème relevé. Les apports observés sont notamment mesurés en temps à la réception et la préparation de commandes. Il ressort de cette expérience que l'obligation de renseigner le système d'information peut induire une perte de temps par rapport au fonctionnement sans RFID, mais que les gains à la réception compensent ces éventuelles pertes. Une évolution du scénario incluant l'étiquetage RFID des pièces à l'unité serait intéressante à observer car l'alimentation du système d'informations pourrait alors être assistée.

Ces résultats nous apportent l'opportunité de poser la question d'un déploiement général et collaboratif de solutions RFID, et d'un éventuel partage des coûts et gains relatifs à l'apposition de tags dès les produits initiaux, aux temps de traitement des activités, à l'acquisition rapide de données et aux apports managériaux (gestion des stocks et commandes) rendus possibles, ainsi qu'à l'implémentation de détrompeurs.

### 1.2.4 Applications au milieu médical

Les apports généralement attendus au travers de la mise en place de systèmes RFID sont la réduction des temps d'inventariage, une automatisation de processus de vérification et un partage de l'information en temps réel qui améliorent la réactivité de la chaîne logistique. Ces apports pourront être adaptés dans le contexte médical, de même que certains apports spécifiques pourront être décelés. De plus, certains apports, comme l'utilisation de l'information ambiante pour générer des détrompeurs ou la prévention de ruptures de stock, n'auront pas les mêmes conséquences dans un contexte industriel que dans le milieu hospitalier.

L'utilisation de technologies RFID dans les systèmes hospitaliers reste relativement récente, mais son augmentation croît continuellement (voir section 1.2.2, premier paragraphe). Leur fiabilité et le fait que le temps d'accès aux informations soit compatible en pratique quotidienne [Neulier et al. 2008] laissent à penser que cette évolution n'est pas prête de cesser. Nous proposons dans cette partie de décrire quelques exemples et possibilités d'utilisation de ces technologies sans contact dans le milieu hospitalier.

**1.2.4.0.1 Les Médicaments** Les apports que sont la lutte contre la contrefaçon, les rappels de lots, la vérification des dates de péremption et une meilleure gestion des stocks ont été décrits dans le précédent chapitre. On peut également citer le cas particulier des poches de transfusion de sang, dont la vérification des conditions de conservation a une grande importance et la spécificité est importante [Jiang et al. 2005]. L'étude de cas, chapitre 4.3, décrit un apport particulier du suivi des produits chimiothérapeutiques.

**1.2.4.0.2 La compliance** La compliance, ou l'observance, désignent le fait qu'un patient respecte la posologie de ses médicaments. [Castot et al. 2008] indique de plus que 23% des déplacements d'infirmières à domicile le sont pour une bonne compliance. Certains dispositifs peuvent aider à la bonne compliance. Certains dispositifs permettent de comptabiliser et/ou d'interdire l'ouverture de boîtes de médicaments lorsque celle-ci a déjà été utilisée (le capuchon MEMS de AARDEX, Med-ic ECM et eCAP de IMC). Des rappels de la posologie prescrite,



via différents types d'interface (nabaztag ou autres [Swedberg 2010]) sont également possibles. [Bacheldor 2006] décrit un système d'administration automatique d'insuline d'une grande précision programmé ou au travers d'analyses en temps réel. D'un point de vue prospectif, la possibilité d'administrer automatiquement une médication via un système sous-cutané [Proos et al. 2008] et de tagger les médicaments à l'unité à l'aide de puces digestes [Bacheldor 2007] permettraient de contrôler les prises de médicaments avec précision. Ces solutions, en plus ou moins grande partie technologiques, peuvent s'avérer discutables dans certains cas. Il est important de définir des cas d'application adaptés, notamment avant d'imaginer implanter un système de posologie automatisé dans le corps. Il est cependant indéniable que l'accès à l'information et des alertes automatisées peuvent sensibiliser les malades et aider à éviter des surdosages. On pense notamment aux patients atteints de maladies impliquant une importante neurodégénérescence.

**1.2.4.0.3 Le suivi des déchets médicamenteux à risque infectieux** De manière générale, [Haguenoer 2010] considère qu'il peut exister un risque d'atteinte à la biodiversité ainsi qu'à la qualité des eaux destinées à l'alimentation humaine à cause du rejet de résidus de médicaments dans l'environnement. Ces rejets provenant principalement des urines et fèces et donc dans les eaux usées des substances médicamenteuses et de leurs métabolites, mais également de "sources ponctuelles avec parfois des concentrations très élevées dans les rejets des industries chimiques ou pharmaceutiques, des établissements de soins, mais aussi des élevages intensifs et dans l'aquaculture". Il existe un risque plus grand de pollution des sols et eaux via le rejet dans la nature de médicaments, ou d'objets ayant été en contact direct avec des médicaments. De plus, le fait que l'un de ces objets, notamment piquant, coupant ou tranchant ne suive pas le parcours d'élimination qu'il est censé suivre peut porter des risques infectieux au niveau des centres de tri ou pour les éboueurs. On peut donc porter un intérêt à savoir avec quel type de pathologie et traitement les objets retrouvés à ces niveaux ont pu être en contact. [Collomp et al. 2010] décrit un projet pilote, Pac-ID DASRI, qui vise à tracer les boîtes de déchets infectieux (Déchets d'Activité de Soins à Risque Infectieux), notamment pour les patients en auto-traitement, et des intérêts à utiliser les technologies RFID pour cette traçabilité.

**1.2.4.0.4 L'identification des patients** [Katz and Rice 2009] décrit un système d'identification pensé pour tracer les patients d'actes chirurgicaux basé sur les RFID. A ce système est associé un ensemble de détrompeurs au niveau préopératoire et l'affichage automatique du dossier du patient et des opérations prévues lors de son arrivée au bloc opératoire. Des gains de temps dus à l'automatisation de tâches administratives ont également été observés, ainsi qu'une réduction des attentes et une meilleure perception de la qualité de l'hôpital par les patients. Wang et al. [2006] soulèvent, pour une généralisation de l'auto-identification des patients, la difficulté d'implémenter les détrompeurs associés à un cas général, ainsi que de possibles impacts nocifs des ondes (psychologiques ou physiques). L'étude [Katz and Rice 2009] indique que les patients sont rarement opposés à l'utilisation des RFID dans l'hôpital. Cela peut s'expliquer par le fait que les patients sont conscients qu'une mauvaise traçabilité peut mener à des effets iatrogènes et indésirables, et que l'exposition de sa vie privée au sein d'un hôpital peut paraître moins risquée. L'informatisation des données peut sur ce point particulier être protec-

teur des informations personnelles, lorsqu'on le compare à la présence d'une fiche de diagnostic ou de prescription au pied du lit notamment. La crainte concernant des interactions dangereuses avec des dispositifs implantables comme les pacemakers a été écartée par la Food and Drug Administration [Food and Drug Administration 2010]. Si des expériences en laboratoire ont montré un danger potentiel, celles-ci concernaient des cas extrêmes ne représentant pas des cas d'utilisation normale.

**1.2.4.0.5 Le suivi des dispositifs médicaux** L'assurance de la bonne stérilisation par une traçabilité renforcée améliore la sécurité, et permet un éventuel gain de temps. Une application connexe consiste en l'utilisation de l'avantage de pouvoir vérifier le contenu d'un plateau chirurgical rapidement, afin de vérifier que le plateau est complet avant son entrée dans une salle d'opération. L'absence de fournitures chirurgicales peut nécessiter le besoin d'arrêter l'acte en cours en attendant que l'outil en question soit apporté. Une augmentation des risques nosocomiaux apparaît alors du fait qu'un protagoniste de l'intervention doit sortir de la salle "propre" si elle ne dispose pas d'espace de stockage d'instruments d'avance.

van de Klundert et al. [2008] observent que d'importantes économies peuvent être réalisées en améliorant les principes logistiques de stérilisation des instruments opératoires, c'est à dire une stratégie de décomposition des plateaux chirurgicaux en stérilisation adaptée et l'approvisionnement des salles d'opération en flux tirés. La vérification de la composition des plateaux et le besoin de parer à des besoins non planifiés sont des éléments qui nécessitent une bonne information en temps réel, van de Klundert et al. [2008] supposent l'accès à cet information possible via le marquage RFID des instruments. Concernant les dispositifs médicaux implantables (DMI), toute erreur a de lourdes conséquences car elle nécessite une opération chirurgicale ou l'annulation de celle-ci dans le cas d'une erreur d'estimation du stock, éventuellement après que le patient n'ait subi l'anesthésie. [Swedberg 2009a] : la société <http://www.implanet.com/> propose une solution de traçabilité et de sécurisation des DMI par RFID, qui apporte une solution pour les nouvelles normes de sécurité et facilite la logistique. [Bertrand and Schlatter 2009] et [Lebon 2009] présentent des études de mesure et de réduction des dangers lors de la mise en place de la traçabilité des ancillaires par RFID. Une attention particulière a été portée à l'égard des éponges chirurgicales, dont l'oubli a été estimé être l'origine de 0.7% des plaintes par Kaiser et al. [1996] et pour lesquels des systèmes RFID existent désormais [Ballard 2003] qui peuvent au moins partiellement être lus à l'intérieur d'un corps vivant [Rogers et al. 2007].

**1.2.4.0.6 Le suivi des blouses à la blanchisserie** Le projet [Calais 2007] a été une réussite, dans le sens où l'étiquetage des blouses du personnel soignant et de leurs armoires ont non seulement permis d'assurer le fait que la blouse qu'utilisent les membres du personnel est bien propre, mais également d'utiliser leur identifiant unique pour regrouper les services des blanchisserie en assurant leur bonne gouvernance.

**1.2.4.0.7 La géolocalisation et la mutualisation des machines et dispositifs médicaux** Qui peut mener à une mutualisation plus facile, et un important gain du temps passé à les chercher. Cet apport peut être vital lorsque l'on parle par exemple de défibrillateurs. Tagger ce type de machines permet en outre d'améliorer la surveillance de leur bon entretien. [Efe et al. 2009]

propose une classification et une étude prospective afin de mieux gérer les politiques de transfert des machines médicales entre les services.

**1.2.4.0.8 Le contrôle d'accès** L'émergence de la dématérialisation des dossiers patients et prescriptions implique de nouvelles pratiques pour assurer la traçabilité. L'utilisation de chariots informatiques et/ou des bornes dans la chambre du patient rend nécessaire pour chaque intervenant l'acte d'identification pour accéder aux informations lui étant dédiées. Cette action peut être réalisée via un login/mot de passe mais également en utilisant un badge personnel, qui sera plus difficilement dupliqué si il utilise une technologie d'identification par radiofréquences. L'accélération de la durée d'identification est également un élément jouant en faveur d'une identification par badge.

L'accès à certaines zones restreintes (salles de repos, parkings dédiés, laboratoires, ...) peut également être contrôlé via l'utilisation du même dispositif d'identification (souvent une carte), et pourquoi pas le paiement de certains services par le personnel, comme les repas par exemple. Ces utilisations permettent une sécurisation des informations médicales des patients en même temps qu'un gain de temps pour le personnel hospitalier.

**1.2.4.0.9 Réseaux de capteurs et monitoring à domicile** [Alemdar and Ersoy \[2010\]](#) et [Chan et al. \[2009\]](#) fournissent un ensemble d'exemples d'utilisation de capteurs sans fil, utilisant différents ensembles de technologies dont les RFID pour mieux suivre et contrôler la santé des personnes. Les applications décrites incluent de nombreuses possibilités d'interactions entre différentes technologies qui améliorent la qualité de vie, notamment des enfants, des personnes âgées ou des patients atteints de maladies chroniques. Plusieurs problématiques sont soulevées concernant la construction de tels réseaux et applications de contrôle de la santé personnels, notamment la privauté, la sécurité et la sensibilité au contexte, permettant de réduire les fausses alarmes. Les utilisations des technologies permettent notamment la détection de chutes, l'aide à la compliance, l'observation de signes vitaux pour l'automatisation d'alertes, adaptées à certains états de convalescence ou dans un cas plus général. Les idées et premiers résultats d'applications de santé contextuels et pervasifs ouvrent des perspectives de recherche et développements ; de tels systèmes pourraient progressivement se développer et toucher l'ensemble des personnes.

La diffusion de l'innovation est un problème complexe. Notre cas d'application l'est d'autant plus qu'il concerne un type de technologies controversé et dont les impacts ne sont pas mesurables trivialement. Le cas d'application, le milieu de la santé, est lui même complexe et sa performance difficilement mesurable.

## 1.3 Conclusion / Présentation des études de cas

Cette thèse a été financée dans le cadre du projet MISTRALS. Ce projet a pour objectif de définir et mettre en place des solutions RFID dans des tumorothèques et un centre pharmaco-technique de production de chimiothérapies. L'intérêt de ce projet est double. Premièrement, le développement de solutions adaptées à des usages particuliers est un défi technologique. Deuxièmement, l'observation des l'impact de ces solutions mises en place permettra de quantifier en partie l'intérêt qu'auraient d'autres centres du même type à adopter ces technologies.

Une tumorothèque est une banque d'échantillons biologiques (ou biobanque) particulière car rattachée à un centre de lutte contre le cancer. Le rôle d'une biobanque est de transformer, stocker, conserver et mettre à disposition des échantillons biologiques issus d'êtres vivants. Ces échantillons seront notamment utilisés pour diagnostiquer les patients, tester de nouvelles thérapies, ou éventuellement dans le cadre de la médecine légale. Chaque échantillon doit donc être associé à l'être prélevé, notamment à ses informations phénotypiques.

Les services hospitaliers partenaires du projet MISTRALS sont :

- La tumorothèque du CHU-CAL de Nice ;
- La tumorothèque de l'Institut Paoli Calmettes (IPC) ;
- Le service de pharmacotechnique du CHU de Nice, dont une importante partie de l'activité concerne la production de cytotoxiques.

Dans ce chapitre introductif, nous nous sommes efforcés de décrire le contexte actuel. Nous y avons soulevé les points suivants :

- La nécessité d'augmenter la productivité hospitalière ;
- L'intérêt d'améliorer la traçabilité dans le cadre de la production de soins, porté notamment par de nouvelles réglementations ;
- L'émergence des nouvelles technologies d'identification sans contact ;
- La difficulté de prédire l'adoption de nouvelles technologies ;
- La difficulté de quantifier précisément les impacts des RFID, qui vient notamment du fait que ces technologies permettent des modifications organisationnelles et de nouvelles activités.

Ces différents points légitiment le projet MISTRALS, mais également l'intérêt que l'on pourra avoir à disposer d'outils d'estimation de l'impact des technologies RFID adaptés aux systèmes auxquels elles sont appliquées. Certains points particuliers peuvent appuyer encore l'intérêt du projet. Dans le cas des banques d'échantillons biologiques, les nouvelles techniques que sont la toxicogénomique, l'utilisation de cellules souches provenant par exemple du sang placentaire, ainsi que de nouvelles applications de partage et d'échange d'informations [[e cancer.fr](http://e-cancer.fr) 2007] font envisager un accroissement de leur activité dans les prochaines années, notamment au niveau des échanges d'échantillons entre les centres. Ces échanges nécessitent une traçabilité de qualité, sans laquelle certains hospitaliers pourraient être réticents à utiliser des échantillons provenant d'autres centres, et certains patients de ne pas autoriser l'utilisation de leurs échantillons de peur que des informations les concernant ne soient divulguées. Au niveau des centres de production de chimiothérapies, de nombreux arguments ont été cités dans ce chapitre comme le "Plan Cancer" ou multiplication des protocoles de soins et des essais cliniques.

Les solutions décrites par MISTRALS ont toutes deux, d'après l'approche de classification des systèmes intelligents de [[Meyer et al. 2009](#)], un niveau d'intelligence au moins du niveau de la "notification de problèmes", avec la possibilité de contourner les alertes. Les pilotes tels que définis n'incorporent pas d'agrégation automatisée de l'intelligence. La localisation de l'information dépend de l'étape de la vie des produits taggés. L'information sera incorporée au tag du produit uniquement lors du transfert de celui-ci à l'extérieur de l'établissement.

Notre sujet d'étude est l'estimation des impacts des solutions proposées, dans ces deux cas d'application. L'objectif est la création d'outils permettant à des services hospitaliers similaire d'en faire de même facilement. Nous avons vu dans ce chapitre qu'il était difficile d'estimer à la fois la performance d'un système hospitalier et de l'impact des RFID dans un quelconque sys-

tème de production. Le chapitre suivant décrit les principaux outils nécessaires pour répondre à ces questions. Une première partie s'intéresse aux outils de mesure de la performance hospitalière. Nous présentons ensuite des outils de recherche opérationnelle adaptés à ce contexte, puis décrivons différentes approches de simulation.

Les chapitres suivants décrivent successivement les travaux effectués concernant les deux cas d'usage "MISTRALS Biobanques" et "MISTRALS Chimio.". Dans les deux cas nous avons proposé un usage des technologies innovant, qui ont soulevé des problèmes d'optimisation innovants. Nous avons intégré une approche d'optimisation concernant ces usages à une simulation qui estime la performance des services modélisés. Ces simulations se veulent paramétrables afin de permettre à un utilisateur de les configurer conformément aux caractéristiques propres à un service similaire, ou à des outils technologiques n'ayant pas exactement les mêmes paramètres de fonctionnement que ceux que nous avons utilisés.





# Chapitre 2

## Présentation des outils

*"To the man who only has a hammer in the toolkit, every problem looks like a nail." (Abraham Maslow)*

Ce second chapitre introductif a pour objectif d'introduire et de décrire des outils permettant d'estimer les impacts des RFID dans le contexte de la production de soins. L'estimation de l'impact des RFID est généralement difficile, notamment parce que ces technologies peuvent mener à la définition de nouvelles activités, ou à des modifications organisationnelles. Une implémentation aboutie de ces technologies nécessite un travail de réingénierie et un temps d'adaptation des acteurs du système. Nous présentons d'abord un ensemble d'approches opérationnelles de mesure de la performance.

Nous décrirons ensuite les principaux outils de Génie Industriel et de Recherche Opérationnelle utilisés pour optimiser les systèmes de production de soins, ces outils pouvant être nécessaires à l'accompagnement du changement et à une implémentation efficace des processus modifiés ou apportés par l'utilisation de technologies.

Un objectif de ces travaux est d'apporter un outil permettant d'estimer la performance de différentes possibilités d'implémentation d'une technologie. Nous nous intéresserons donc à différentes approches de simulation, dans le but de comparer leur pertinence en tant que plateforme de pilotes virtuels.

### 2.1 Mesure de la performance en Santé

Pour l'Association Française de Génie Industriel, un indicateur de performance est "une donnée quantifiée qui mesure l'efficacité et/ou l'efficacité de tout ou partie d'un processus ou d'un système (réel ou simulé) par rapport à une norme, un plan ou un objectif, déterminé et accepté dans le cadre d'une stratégie d'entreprise" [AFGI 1992]. Il existe ainsi de nombreux indicateurs de performance adaptés aux particularités de chaque système, visant à évaluer l'état de celui-ci par rapport à des objectifs. Evaluer l'impact d'une modification dans un système s'effectue donc en mesurant l'écart de performance entre les états du système avant et après que son fonctionnement ait évolué.



Nous décrirons dans un premier temps des approches et indicateurs généraux cherchant à mesurer la performance concernant les systèmes sociotechniques de production que sont les systèmes de santé et les établissements hospitaliers. Nous nous focaliserons ensuite sur la prise en compte du risque, dimension particulièrement importante de la performance médicale. Nous définirons enfin un ensemble de dimensions qui doivent être considérées dans une étude traitant de la modification d'un système de production de soins par l'introduction de technologies communicantes.

### 2.1.1 Indicateurs de performance opérationnels

La production de soins est un ensemble de processus particuliers. Leur organisation est difficile à cause de nombreuses incertitudes à chaque étape, d'interactions à plusieurs niveaux et notamment d'objectifs concurrents.

#### 2.1.1.1 Le production de soins : des biens et des services

[Balin 2007] décrit avec précision les définitions issues de la littérature de ce qu'est la production de services, et y critique des définitions de ce qu'est un "service", n'estimant pas les quatre caractéristiques les plus citées (l'"*IHPI of services*" : *Intangibility, Heterogeneity, Inseparability & Perishability*) valides pour toutes les classes de services. On observe des concordances et de subtiles différences entre ces définitions suivant le point de vue adopté. [Balin and Giard 2007] propose une définition de la notion de service d'un point de vue processus ; un service est alors défini comme l'apport de matériel, informations ou modifications à une entité (machine ou personne) via des opérateurs ou machines, de complexité appropriée à la requête du client.

Cette définition comporte plusieurs points à prendre en compte et pondérer au cas par cas, il en ressort qu'il existe plusieurs types de services. On peut en effet aisément différencier le fait d'apporter des modifications à l'état d'une personne via la prescription d'une médication, éventuellement son administration et un suivi de ses effets, du fait de lui proposer une assurance automobile adaptée au kilométrage parcouru annuellement.

Il y est souligné qu'il existe une "relation" entre la production de biens et celle de services, un "continuum bien-service". Le fait d'avoir à produire des consommables fait donc partie du système particulier du service qu'est la prodigation de soins. Une particularité importante est le fait que le système modifié est l'humain, ce qui rend d'autant plus important l'aspect de la "qualité perçue" dans l'estimation de sa performance.

Bostan et al. [2007] montrent que la qualité perçue est par ailleurs relative aux attentes des patients, et que si certains indicateurs sont plus importants aux yeux de toutes les catégories des sondés, une bonne qualité perçue doit être mise en relation avec le niveau d'attente des usagers. Isaac et al. [2010] observent au travers d'une étude comparant 927 hôpitaux que la perception des patients, et leur propension à recommander un hôpital où ils ont séjourné, ont d'importants points communs avec les observations de la qualité mesurée par l'"Hospital Quality Alliance" de ces établissements. Si la qualité perçue d'un service ou établissement hospitalier doit être mise en relation avec les attentes des patients, elle est tout de même significativement proche de la qualité du service produit.

La production de soins est principalement un service, mais elle inclut la production de biens, principalement des médicaments (génériques ou sur mesure). L'estimation de la performance de ces systèmes pourra donc être approchée via l'un ou l'autre de ces type de systèmes de production, et idéalement une combinaison de ces deux approches.

### 2.1.1.2 Modèles de représentation et d'étude de performance

[Kruk and Freedman 2008] propose une revue de la littérature concernant les systèmes de soins dans les pays en développement. Il propose un cadre d'étude des impacts des politiques, des financements et de l'organisation du système sanitaire (figure 2.1). Ces trois entrées impactent les indicateurs, regroupés par catégories affectées aux dimensions de la performance proposées, que sont l'efficacité (accès aux soins, qualité de service), l'équité (groupes défavorisés), et l'efficacité (dimensionnement des fonds, productivité, efficacité administrative). Une différence est apportée à ces dimensions, qui sont caractérisées au niveau de leur rendement (impact sur le système) ou des résultats produits (impacts sur la santé publique / la satisfaction). Par exemple, l'indicateur "les femmes enceintes reçoivent quatre visites prénatales" fait partie de la catégorie "Utilisation de l'accès aux soins", relatif à la dimension de la performance "Efficacité (rendement)". Cette étude se place à un haut niveau décisionnel (politiques globales à l'échelle de nations) et cherche à qualifier la qualité d'un système de soins. Il peut être intéressant de se positionner à ce niveau dans le cas d'une évaluation des impacts de déploiement d'une technologie à grande envergure.

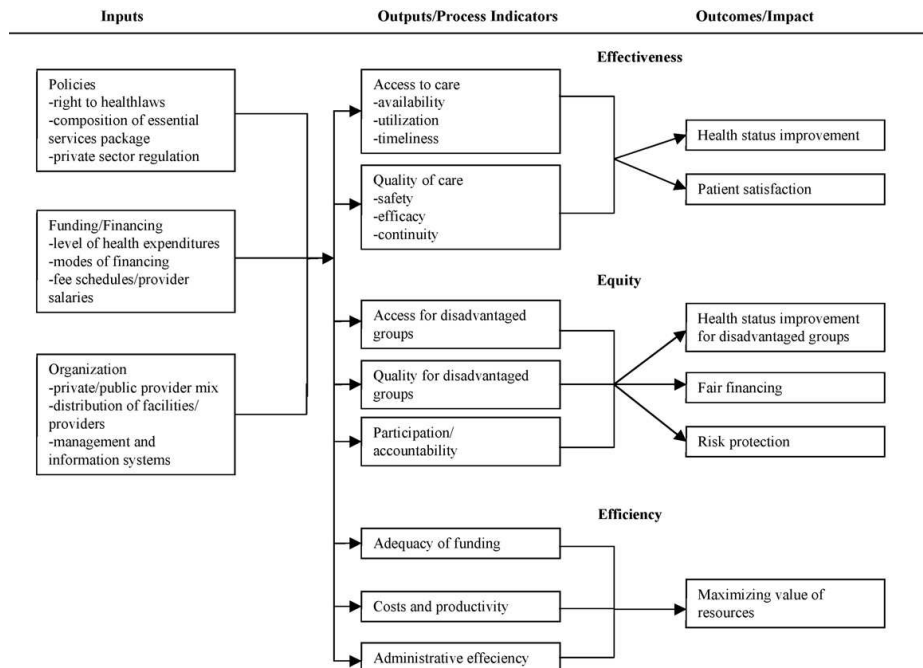


FIGURE 2.1 – Description de la mesure de performance des systèmes de santé.

Au niveau d'un établissement, Minvielle et al. [2007] mettent en évidence le caractère par-

fois concurrent des indicateurs utilisés par les différents décideurs. Les points de vue des différents groupes de personnel (médecins, administratifs, personnel soignant) y sont comparés. Ils s'appuient sur les quatre principales dimensions de la performance d'une organisation correspondant ([Parsons 1951]) aux principales fonctions que tout système sociotechnique doit posséder pour survivre et se développer. Ces dimensions définissent la capacité du système à :

- viser et atteindre un objectif particulier,
- s'adapter par rapport à l'environnement dans lequel il évolue,
- définir clairement l'ensemble de ses processus de production,
- valoriser les compétences et l'efficacité de ses membres.

[Quinn and Rohrbaugh 1983] propose par la suite une représentation graphique (figure 2.2) qui intègre ces aspects de la performance d'une organisation en quadrants. Cette représentation n'est pas adaptée à l'élaboration de comptes rendus de résultats mais elle permet de mieux comprendre les corrélations et conflits entre les intérêts des différents types de décideurs au travers de leur vision.

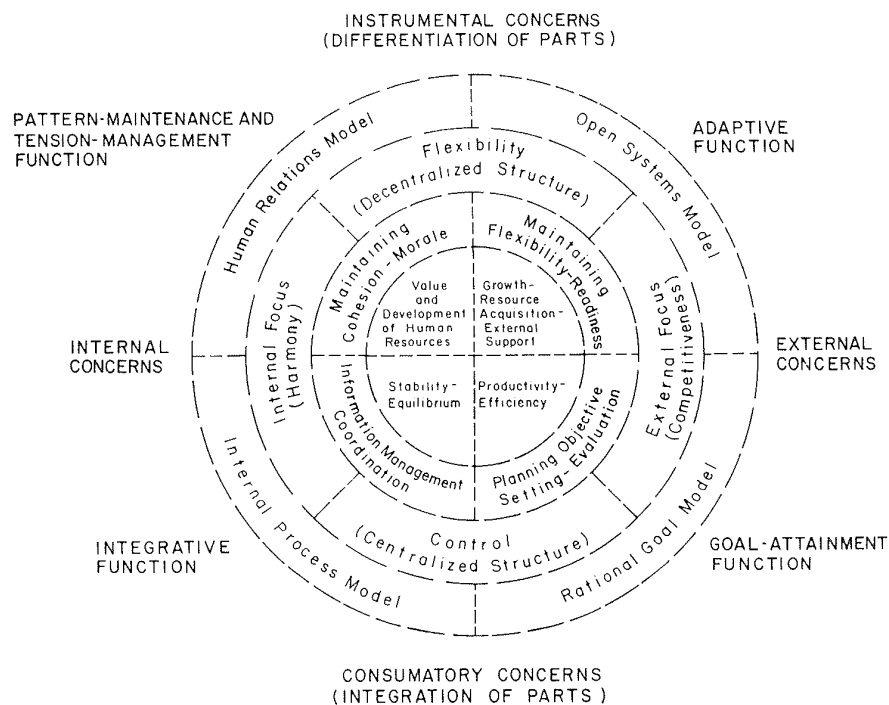


FIGURE 2.2 – Représentation spatiale de critères compétitifs d'efficacité.

Minvielle et al. [2007] rapportent les difficultés rencontrées par différents auteurs qui cherchaient à rassembler les modèles et indicateurs de performance à cause de leur caractère compétitif. Ils concluent que la vision de la performance hospitalière contient des dimensions supérieures et inférieures aux concepts d'efficacité, efficience et de qualité des soins ; ils seront donc difficilement positionnables sur la représentation des critères d'efficacité (figure 2.2). Certains de ces indicateurs "singuliers" font consensus parmi les acteurs de la production de soins. Les valeurs humaines notamment, comme le fait de respecter la confidentialité et la dignité du patient, l'empathie envers lui et la non-discrimination des patients sont importantes aux yeux

de toutes les catégories. Le second point pour lequel le discours de l'ensemble des acteurs est homogène concerne la caractérisation de l'organisation, au travers par exemple de la continuité des soins ou de la recherche d'amélioration des soins préventifs et curatifs. Il est intéressant d'observer que ces points consensuels font partie des indicateurs sélectionnés par [Kruk and Freedman \[2008\]](#).

D'après [Lejeune \[2001\]](#), il existe quatre grandes méthodes d'analyse en matière de santé : minimiser les coûts, favoriser le résultat financier, maximiser l'effet clinique et favoriser le principe d'utilité. Le choix de la méthode dépendant de la sensibilité et des convictions de chacun. Il conclut en dévoilant son point de vue personnel par un appel au respect de valeurs de solidarité et d'humanisme.

L'évaluation de la performance d'un système de santé ou d'un établissement médical dépend du point de vue adopté. Un cadre d'évaluation commun pourrait permettre de mieux comparer les estimations effectuées dans différents systèmes et de comparer différents systèmes entre eux. Le maintien de ce cadre dans le temps permettrait également de mieux observer les impacts de la modification de politique, de financement ou d'organisation ayant eu lieu au sein d'une même société.

### 2.1.1.3 Coordination de la mesure de la performance

[COMPAQH \[2003\]](#) <sup>1</sup> est un projet de recherche français à visée opérationnelle, mis en œuvre par l'INSERM <sup>2</sup>. Il vise à développer, sélectionner, valider et proposer à la généralisation des indicateurs de performance. Depuis sa création en 2003, ce projet a sélectionné 63 indicateurs, construit puis testé 42 d'entre eux et proposé 32 indicateurs à la généralisation. Le choix des indicateurs est effectué conformément à des objectifs prioritaires.

Deux campagnes de tests sont effectuées pour chaque indicateur à étudier. La première estime la faisabilité d'utiliser ce type d'indicateur, il s'en suit une éventuelle actualisation de l'indicateur, en accord avec les experts du domaine et les sociétés savantes. Puis une seconde campagne d'expérimentation estime la qualité métrologique de l'indicateur (reproductibilité, validité et pertinence). Les neuf objectifs prioritaires de COMPAQH énumérés ci-après ont mené à la définition, l'expérimentation et la validation de nombreux indicateurs de performance.

1. Lutter contre la douleur
2. Assurer la continuité de la prise en charge des patients
3. Lutter contre les troubles nutritionnels
4. Améliorer la sécurité des patients
5. Prendre en compte le point de vue des patients
6. Le respect des bonnes pratiques cliniques

---

1. COMPAQH : COordination pour la Mesure de la Performance et l'Amélioration de la Qualité Hospitalière

2. INSERM : Institut national de la santé et de la recherche médicale

7. Accroître la motivation, la responsabilisation et l'évaluation des compétences des professionnels au contact du patient
8. Garantir l'accessibilité
9. Garantir la coordination des soins et améliorer la prévention secondaire

Les indicateurs concernant ces neuf objectifs sont très précis et contextuels. L'ensemble de ces indicateurs, généralisables ou non, illustre la difficulté de caractériser et d'évaluer les établissements médicaux dans leur ensemble. Il rappelle également l'importance de la traçabilité et de l'accès aux nombreuses informations relatives à l'acte médical, ne serait-ce que pour la mesure de la performance. L'introduction de solutions de traçabilité et d'acquisition automatisée de données peut avoir dans ce sens un intérêt considérable car il permet d'améliorer la mesure de la performance des systèmes, sans quoi il est difficile d'estimer son évolution et la pertinence de nouvelles consignes et politiques.

### **2.1.2 La gestion des risques**

Les erreurs spécifiques à la production de soins peuvent avoir un impact dramatique pour le patient. Elles peuvent également impliquer le traitement des effets entraînés par ces événements indésirables, ce qui pénalise le système en augmentant la charge de travail et le coût de traitement du patient, sans compter d'éventuelle poursuites judiciaires. La gestion des risques est donc un enjeu majeur dans l'organisation hospitalière.

[Rasmussen \[1997\]](#) décrit le système sociotechnique impliqué dans la gestion des risques. Il rapporte une vision des interactions entre les différentes instances décidant des lois, réglementations, politiques industrielles, fiches de postes, actions et incidents. L'objet de cet article est d'abord de souligner la complexité de la création et l'application de réglementations nécessaires pour éviter l'apparition d'incidents globalement. L'adaptation des jugements, lois, réglementations, politiques et recommandations de bonnes pratiques à des systèmes ayant leurs particularités est en effet difficile. L'auteur déplore finalement le fait que les systèmes de recherche et de régulation ne soient pas adaptés car pas facilement généralisables pour mener des recherches et études menant à des propositions efficaces.

#### **2.1.2.1 Quelques méthodes opérationnelles de mesure du risque**

Il existe de nombreuses méthodes d'analyse des risques, adaptées à différentes problématiques allant de dangers concernant les installations nucléaires jusqu'aux logiciels informatiques, en passant évidemment par du milieu médical. Nous décrivons ici les plus connues et adaptées aux problématiques de la Santé.

L'objectif est globalement d'identifier, de quantifier, de définir un degré d'acceptabilité de l'ensemble des risques afin de mettre en place des actions de sécurisation, ou du moins de définir la faisabilité de l'amélioration de la sécurité [[Bonnabry 2010a](#)].

**2.1.2.1.1 Failure Modes, Effects and Criticality Analysis (FMECA)** Appelée AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et leur Criticité) en français. Elle consiste en quatre étapes successives : l'initialisation, la décomposition du fonctionnement du système,

l'analyse des défaillances (mécanismes, criticité, actions correctives) et la synthèse. Cette méthode a par exemple été utilisée par [Bonnabry et al. \[2006\],\[2008\]](#) pour améliorer la sécurité du processus de chimiothérapies oncologiques, estimer les effets de la centralisation des préparations, l'apport de technologies de l'information et l'impact de systèmes d'assistance à la prescription informatisée.

**2.1.2.1.2 Méthode Organisée et Systémique d'Analyse des Risques (MOSAR)** MOSAR est une méthode qui consiste en l'identification, l'analyse, la maîtrise, la gestion et le management des événements non souhaités. Cette méthode s'appuie initialement sur la Méthodologie d'Analyse des Dysfonctionnements dans les Systèmes (MADS) [[Verdel 2000](#)], qui décompose le système global en trois sous-systèmes : un sous-système opérant, un sous-système d'information et un sous-système de pilotage. MADS représente les systèmes connexes aux événements non souhaités et leurs interconnexions. Il permet d'identifier l'enchaînement des événements qui conduit à un événement non souhaité. Si MOSAR a été développée spécifiquement pour la MADS, celle-ci peut en fait s'appliquer comme modèle théorique à d'autres méthodes d'analyse des risques, comme l'AMDEC. Une analyse des risques au travers de MOSAR se décompose en une partie macroscopique puis une partie microscopique de l'analyse systématique des risques en s'appuyant sur des techniques existantes, avec une préférence pour la MADS.

**2.1.2.1.3 Hazard Analysis Critical Control Points (HACCP)** L'HACCP est basée sur sept principes, définissant une séquence en douze points dont : la description du produit ; l'élaboration et la vérification du diagramme des opérations ; la définition des risques (importance de l'équipe menant l'étude), points de contrôle critiques et procédures de vérification ; l'instauration et la vérification des procédures de vérification puis la constitution de dossiers explicatifs menant à une bonne tenue des registres. Cette méthode a initialement été créée dans le but de valider la bonne qualité et conservation de produits alimentaires destinés aux astronautes ; elle a été largement utilisée dans le domaine de l'alimentation depuis. Elle a également été utilisée avec brio dans le milieu hospitalier, pour l'alimentation évidemment [[Shih and Wang 2011](#)], mais aussi la stérilisation d'endoscopes [[Griffith et al. 2005](#)] ou la réduction d'infections post-opératoires [[Baird et al. 2001](#)].

**2.1.2.1.4 RECUPERARE-Santé** Ce modèle vise à la reconstruction de la chronologie des événements menant à et découlant des incidents / accidents. Les objectifs sont de comprendre les causes et d'évaluer la performance pendant la phase de récupération en identifiant le temps nécessaire entre l'apparition de l'événement, sa détection et l'intervention nécessaire au rétablissement du système. Cette méthode est définie par [De MarcellisWarin \[2005\]](#), qui s'appuie sur le modèle RECUPERARE développé par l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN). L'importance apportée par cette méthode sur la phase de récupération des incidents est justifiée par le fait que le risque zéro n'existe pas. Cette approche nous intéresse particulièrement car les technologies auto-communicantes ont un grand potentiel dans la réduction du temps de détection des incidents.

**2.1.2.1.5 Le retour d'expérience** Le Retour d'Expérience est, d'après l'Institut pour une Culture de Sécurité Industrielle [ICSI 2008], une démarche qui permet d'apprendre de ce qui s'est passé afin de mieux maîtriser l'avenir. Elle consiste à :

- Recueillir des informations sur des incidents anomalies, et accidents ;
- Analyser leurs causes ;
- Mettre en place des actions correctives et /ou préventives afin d'éviter qu'elles se reproduisent.

Desroches [2005] propose une démarche en sept étapes successives :

1. Recueil des données ;
2. Sélection et traitement des expériences ;
3. Validation et acceptation des enseignements et recommandations ;
4. Classification de expériences ;
5. Enregistrement des expériences ;
6. Détermination des recommandations applicables aux nouveau projets ;
7. Mesure ou évaluation des résultats de la prise en compte des recommandations.

[ICSI 2008] propose une démarche plus globale légèrement différente. Retenons la huitième et dernière étape qu'ils explicitent et qui paraît évidente dans cette approche : Communiquer le retour d'expérience. [Collomp 2008] observe que cette étape est appliquée partiellement au travers des certifications de la HAS et des réglementations de l'AFSSAPS. Cette approche rend difficile le partage de l'expertise et la diffusion des recommandations car les propositions d'actions sont directement liées à un service ou établissement.

**2.1.2.1.6 Le risque comme indicateur principal** L'idée de centrer la performance autour du risque est inhérente au fait que l'occurrence d'accidents impacte l'ensemble des autres indicateurs de performance, parfois indirectement. Collomp [2008] propose de se baser sur l'analyse du risque iatrogène pour piloter la performance du circuit du médicament dans un établissement hospitalier. Il propose une approche regroupant un staff dédié à la Qualité, Risques et Évaluation des Pratiques Professionnelles (staff QREPP), ses objectifs et son organisation. Pour son bon fonctionnement, il suggère de l'intégrer au service de pharmacotechnie. L'intérêt est de permettre l'utilisation groupée des outils dédiés aux sous-parties du problème et d'apporter une "culture qualité risques", qui est une part importante de l'amélioration continue d'un système de production si profondément humain.

**2.1.2.1.7 Discussion** Ces méthodes nécessitent dans leur majorité d'utiliser des outils d'analyse qualitative du risque. Nous avons cité l'approche MADS, et l'utilisation des grilles AMDEC qui peuvent suffire à conduire une étude de ce type. D'autres outils peuvent aider à mieux orienter l'analyse des situations à risque, par l'identification de leurs causes ou la représentation des résultats de l'étude. L'intelligibilité des résultats permettra de mieux orienter les décisions à prendre pour réduire le risque.

L'élaboration d'arbres d'évènements, arbres des causes/défaillance et le diagramme causes-conséquences s'effectue en affectant à chaque nœud un type d'évènement et éventuellement



sa probabilité d'occurrence. Les processus et états se recoupent en portes logiques "ET" ou "OU". [Garnerin et al. 2007] est un exemple de l'utilisation d'arbres d'évènements dans le but de mesurer les probabilités d'erreurs humaines dans la préparation de médicaments. Nous reprendrons certains des résultats de cette étude afin de paramétrer la simulation utilisée dans la section 3. [Talon et al. 2009] décrit précisément ces méthodes et leur complémentarité.

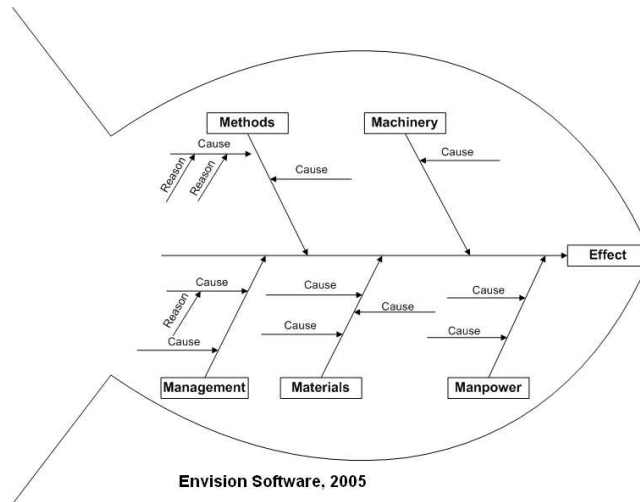


FIGURE 2.3 – Description du diagramme cause-effet d'Ishikawa [Bachelet 2010]

Le modèle Ishikawa, ou "arêtes de poisson" (figure 2.3) est un modèle qui a pour but de regrouper l'ensemble des causes d'une variation de la performance. Les facteurs de l'apparition d'un problème sont regroupés par type, ou dimension, décrites au travers de sous-causes. Des variantes de ce modèle prennent en compte différentes dimensions des facteurs. Les dimensions principalement proposées sont la main d'œuvre, les matières, les méthodes, les machines et le milieu. On pourra rajouter le milieu et les moyens financiers.

Un avantage de cette méthode est qu'elle permet de mettre facilement en exergue les dimensions d'origine des incidents. Leur aspect graphique permet une compréhension et une lecture aisée des résultats de l'analyse.

### 2.1.3 Notre approche

Une étude regroupant plusieurs projets RFID [Meiller and Bureau 2009] suggère un méta-outil d'évaluation du système de Santé, devant être adapté par les décideurs et praticiens pour créer un outil qui soit adapté à leur problématique et niveau d'implémentation des technologies. Il s'appuie sur trois projets pilotes réels : tracer les bouteilles de gaz dans un hôpital, les instruments chirurgicaux lors de la stérilisation et les ancillaires transmis d'un hôpital à l'autre. L'intérêt de proposer un méta-outil réside dans le fait que les indicateurs de performance ne peuvent pas être absolus, notamment dans le cas particulier de l'introduction de RFID dans la Santé.

Les indicateurs de performance que nous utiliserons seront donc adaptés aux systèmes et aux impacts que nous étudierons. Multidimensionnels, ils devront prendre en compte :



- La capacité de traitement de requêtes par le système et l’impact sur le personnel (compétences utilisées, charge de travail ...);
- La qualité, au travers notamment du risque (nombre d’incidents et d’erreurs) et de la rapidité de traitement;
- Les coûts (d’intégration, dus aux modifications du fonctionnement ...) lorsque cela est possible;
- et la satisfaction des patients / clients (qui découle en fait plus ou moins directement des précédents).

La possibilité de quantifier chacun de ces indicateurs en terme de coût financier pourra être envisagée pour déterminer une durée de retour sur investissement. Notons toutefois que si des pistes de transformation d’indicateurs seront proposées, des limites existent et seront également décrites quand à la quantification financière des indicateurs retenus.

Des approches de calcul du coût d’erreurs médicales, qui peuvent mener à des poursuites ou erreurs de justice, et à des infections ou la mort du patient, existent. On peut retrouver une approche permettant cela dans [Howard et al. 2005], qui traite surtout des dangers d’un rejet de greffon, mais il est fort concevable que des études plus précises et générales ont été effectuées, par les sociétés d’assurances notamment. Nous considérons qu’il est préférable de ne pas rapporter le nombre d’erreurs à un coût, d’autant plus qu’il est difficile d’estimer à quels types de complications peuvent mener des erreurs dans les cas étudiés. De plus, des différences peuvent exister entre des systèmes de gouvernance et de prise de décision, et il est probable que de grandes différences existent entre certains établissements, pays, ou décideurs au sein d’une même structure.

Le projet MISTRALS vise l’implémentation de solutions RFID dans des services existants. Royston [1999] concède que l’expérimentation est fréquemment le moyen le plus fiable pour observer les impacts d’une proposition de modification. Il observe toutefois que les coûts d’une telle approche sont élevés, que la mise en pratique peut s’avérer risquée ou éthiquement questionnable et que les observations sont difficiles à extrapoler. L’étape de modélisation comporte de plus la nécessité de décrire précisément le système étudié, ce qui peut provoquer l’émergence d’idées. L’ensemble des possibilités d’implémentation et de réingénierie accessibles au travers de l’utilisation de solutions communicantes oriente notre approche vers l’utilisation de modèles pour évaluer les impacts que peuvent provoquer ces technologies tout en permettant l’utilisation de méthodes d’optimisation concernant les modifications systémiques envisageables. La section suivante présente des outils de recherche opérationnelle ainsi que différentes méthodes de simulation pour discuter de leur applicabilité à nos sujets d’étude.

## 2.2 Génie Industriel et Recherche Opérationnelle

D'après la définition de [Institute of Industrial Engineers \[2011\]](#), le Génie Industriel (GI) traite du design, l'amélioration et l'installation de systèmes intégrés de personnes, matériaux, informations, matériel et énergie. Il regroupe des connaissances et compétences particulières en mathématiques, physique, et sciences sociales avec les principes et méthodes d'analyse et design d'ingénierie pour spécifier, prédire et évaluer les résultats qui seront atteints par de tels systèmes.

"Concevoir et améliorer les systèmes de production ainsi que les produits ou services qu'ils produisent, de manière à les rendre sans cesse plus performants" [[Billaut 2006](#)]. La Recherche Opérationnelle ne connaît pas de définition arrêtée et reconnue par tous. L'encyclopédie Larousse la définit comme un "ensemble de techniques rationnelles d'analyse et de résolution de problèmes concernant notamment l'activité économique, visant à élaborer les décisions les meilleures possibles (au sens d'un ou de plusieurs critères) tout en respectant les contraintes inhérentes à ces problèmes". Plusieurs propositions et modifications ont été proposées par différents groupes et auteurs du domaine. La plus récente est à notre connaissance la définition proposée par [Scolnik \[2011\]](#). Celui-ci appuie son désaccord avec la définition donnée par le groupe *EURO* : "... peut être décrit comme une approche scientifique pour solutionner des problèmes de gestion de systèmes complexes"<sup>3</sup>, car cette définition peut également correspondre à d'autres disciplines, comme la théorie des systèmes. Il propose donc la définition suivante : "La Recherche Opérationnelle est la discipline qui vise à modéliser, comprendre, manager et optimiser les systèmes complexes en combinant des méthodes issues de nombreux domaines scientifiques"<sup>4</sup>.

De part ces définitions, la RO et le GI sont fortement liés. [Billaut \[2006\]](#) défend que "La RO peut intervenir dans tout ce qui concerne l'aide à la décision sur les problèmes de GI qui peuvent être abordés par une approche scientifique".

Les premiers travaux assimilables à la RO remontent à la fin du XVI<sup>me</sup> siècle. Les rares études jusqu'au XVIII<sup>me</sup> siècle concernaient principalement la compréhension et l'estimation mathématique de phénomènes aléatoires, notamment les jeux de hasard. Les méthodes et approches ont grandement évolué avec l'apparition et l'amélioration des outils de calcul informatiques mais les éléments apportés au début de la RO, comme la description statistique, sont toujours utilisées. Le terme *Operations Research* est apparu pendant la seconde guerre mondiale, au moment où les méthodes scientifiques ont dû s'appliquer à l'organisations d'opérations -militaires- d'entreprises humaines [[Saaty 2004](#)].

[[Winston 1993](#)] décrit une méthodologie de la recherche opérationnelle en sept points :

1. Formuler le problème ;
2. Observer le système ;
3. Formuler un modèle mathématique du système ;
4. Vérifier le modèle et l'utiliser pour effectuer de premières prévisions ;

---

3. Texte original : "...it can be described as a scientific approach to the solution of problems in the management of complex systems"

4. Texte original : "OR is the discipline which, by combining methods from many scientific fields, aims at modelling, understanding, managing and optimizing complex systems"

5. Sélectionner une alternative viable ;
6. Présenter les résultats à l'organisation "cliente" ;
7. Implémenter et évaluer les recommandations.

Certaines de ces étapes peuvent mener à un retour à des étapes précédentes de l'étude. C'est notamment le cas des étapes 4 et 6 : la vérification du modèle et la présentation de résultats aux décideurs de l'organisation étudiée.

Les récentes réformes en France ont poussé les acteurs du milieu hospitalier à chercher des moyens efficaces d'améliorer le fonctionnement de leurs systèmes (gestion des flux, réduction des coûts, traçabilité ...). Les méthodes d'amélioration continue, issues du monde industriel, voient leurs possibilités d'application limitées dans le milieu hospitalier à cause notamment du caractère imprévisible de l'évolution de la demande et du traitement d'un patient.

Les nombreuses contraintes et interactions entre les différents services et ressources d'un hôpital rendent complexes les prises de décision à tous les niveaux. L'utilisation de modèles déterministes est alors très discutable et l'utilisation de modèles stochastiques souvent une nécessité.

[Kuljis et al. \[2007\]](#) cherchent à savoir dans quelle mesure la production de soins peut bénéficier des avantages de la modélisation et de la simulation par rapport à ce qu'a pu en tirer le monde industriel. Ils recensent un grand nombre d'objectifs et améliorations dus à l'utilisation de techniques de simulation, dans des secteurs industriels variés. Les auteurs rapportent les sept axes de différenciation présentés par [Kuljis and Paul \[2007\]](#) et concluent que si les méthodes sont potentiellement applicables au secteur de la santé, leur application n'est pas évidente à la santé du fait de ses particularités.

## **2.2.1 La Recherche Opérationnelle en Santé**

[Reyt et al. \[2010\]](#) proposent une revue de littérature qui décrit les principales techniques de Recherche Opérationnelle issues de milieu industriel et appliquées dans le milieu hospitalier, en se concentrant sur les problèmes d'affectation de ressources et de patients. Cet article décrit des exemples concernant l'utilisation de différentes techniques de modélisation et de résolution, ou d'aide à la décision, appliquées à ces problèmes d'affectation. Comme nous l'avons énoncé précédemment, l'évaluation d'hypothèses de modification organisationnelle est un problème particulièrement difficile dans le milieu hospitalier. Quatre outils sont explicitement décrits comme ayant un bon potentiel pour répondre à cette problématique lors de l'estimation d'hypothèses concernant l'affectation et le dimensionnement de ressources : la simulation à événements discrets, la programmation stochastique, la modélisation markovienne et la théorie des files d'attente. Deux outils dédiés à l'optimisation de problèmes d'affectation sont ensuite décrits et un ensemble d'exemples de leur utilisation est apporté : la programmation linéaire et l'utilisation d'heuristiques.

### **2.2.1.1 La programmation stochastique :**

Elle s'avère complémentaire et est parfois incluse à des outils de simulation. L'objectif est de mesurer et d'anticiper la variabilité et de définir les phénomènes aléatoires avec un maximum

de précision en se basant essentiellement sur des historiques. Les utilisations décrites par [Reyt et al. \[2010\]](#) sont l'évaluation des futurs besoins en lits et le dimensionnement des services. L'utilisation des données concernant les flux d'entrée et de sortie des patients (ou de longueur de séjour) permet de définir les futurs besoins, sous réserve d'une certaine stabilité du système. L'éventualité de l'ouverture d'un nouveau service implique l'absence de données statistiques historiques ; ce cas nécessite alors la définition de lois de probabilités concernant par exemple les durées de séjour. Cet exemple est la première occasion de pointer une grande difficulté lors d'élaboration d'études de ce type : l'accès aux données et la configuration des modèles.

**La méthode de Monte-Carlo** consiste en l'utilisation de procédés aléatoires pour approximer une valeur numérique. Elle doit être utilisée lorsqu'il est difficile de déterminer le comportement d'un système au regard d'un paramètre mais qu'il est aisé de tester différentes valeurs de ce paramètre et d'observer l'état de sortie.

**La théorie des files d'attente** constitue un élément de choix lorsqu'il s'agit de travailler sur le dimensionnement de ressources et d'équipes, notamment au niveau des services d'urgence. C'est une théorie mathématique basée sur les probabilités, que certains décrivent comme une extension des modèles markoviens, et leur utilisation peut nécessiter l'utilisation de données historiques, parfois inexistantes.

### 2.2.1.2 La Programmation Linéaire (PL) et la Programmation Linéaire en Nombre Entiers (PLNE)

Ce sont en premier lieu des méthodes de description des problèmes. Les choix et décisions possibles sont numériquement modélisés sous l'appellation de "variables de décision". Les contraintes doivent être décrites sous forme de combinaisons linéaires de variables de décision. On appelle *Fonction objectif* l'expression correspondant à ce que l'on cherche, qui s'exprime également sous forme de combinaison linéaire de variables de décision pondérées. Les formalismes d'écriture de ces programmes, sont décrits dans [\[Brown and Dell 2006\]](#). Plusieurs approches de résolution existent. La résolution des PL est historiquement basée sur l'algorithme du *simplexe*. Les PLNE sont plus compliqués à résoudre sachant que l'ensemble des solutions réalisables est un ensemble de points discrets et non un polyèdre. La principale méthode de résolution des PLNE est dite par séparation et évaluation (branch and bound).

La résolution peut être effectuée à l'aide de nombreuses méthodes, qui peuvent être exactes ou approchées. On appelle un Mixed Integer Program (MIP) un problème dont seulement certaines variables devront être entières et le reste des variables continues. Un Binary Integer Program (BIP) définit le cas où les variables de décision doivent être binaires (0 ou 1).

### 2.2.1.3 Les heuristiques :

Ce sont des méthodes de résolution approchées, qui intègrent parfois un aspect aléatoire dans la construction des solutions, et qui permettent de maîtriser le temps de résolution des problèmes traités. Elles sont utilisées principalement pour traiter des problèmes difficiles ou pour lesquels l'utilisation de méthodes de résolution exactes est très coûteuse en temps d'exécution. Elles permettent en effet de trouver rapidement des solutions réalisables (pour autant qu'il en existe bien sûr) en un temps déterminé. Utilisées seules, ces méthodes ne permettent

pas d'estimer la qualité des solutions obtenues. Cela peut être effectué en comparant les solutions obtenues avec les bornes obtenues suite à la résolution du problème initial relaxé, ou en les comparant aux résultats d'une résolution exacte sur un ensemble d'instances significatif pour estimer globalement la qualité de l'algorithme.

### 2.2.2 Revues de littérature

[Vissers \[2001\]](#) propose une énumération des principaux apports de la Recherche Opérationnelle Hospitalière en décomposant les problématiques de planification abordées suivant les entités décisionnelles impliquées : le patient et sa vision du soin, l'organisation de la production par un simple praticien, l'organisation d'un service ou d'une spécialité, l'organisation des différents services d'un hôpital, l'organisation de l'offre médicale au niveau d'une région et l'organisation sanitaire nationale. Les décisions prises concernant ces niveaux sont liées les unes aux autres.

Ainsi, si [Vissers \[2001\]](#) n'a pas observé l'existence de travaux d'optimisation dédiés à l'amélioration du processus vu du patient, de nombreux travaux prennent en compte les temps d'attente, d'accès aux informations et de prise de décision dans l'évaluation de la performance de leur système. Ces indicateurs sont importantes du point de vue du patient.

Les principales décisions décrites au niveau du praticien et du service spécialisé concernent la définition d'un planning et d'une affectation des ressources efficace et équilibrée. Les tâches qui incombent aux directeurs de centres et managers généraux concernant la gestion d'un établissement hospitalier incluent principalement l'organisation des services et des arrangements avec les organisations externes. Ces processus intègrent des tâches comme la gestion de contrats, l'allocation de budgets, la répartition des ressources, la gestion des systèmes d'information et de classification des patients ainsi que le contrôle de la qualité. Les décisions à prendre à un niveau régional concernent l'équilibrage des différents types de ressources et la contractualisation avec les fournisseurs, ce qui nécessite d'effectuer des travaux d'estimation de la demande, particulièrement pour certains traitements spécifiques. Ces sujets "régionaux" sont moins bien traités dans la littérature par des applications de méthodes de RO que les autres niveaux décisionnels, tous assez bien lotis. Au niveau national, les décisions concernant le financement et la qualité, la définition de priorités et stratégies préventives doivent être prises en accord avec l'estimation des besoins. [Vissers \[2001\]](#) rapporte un ensemble d'exemples concernant chacun des problèmes. Cet article permet d'observer l'utilisation de méthodes comme la programmation linéaire et différents types de simulation.

Certains travaux sont également à placer dans un contexte général, qui ne correspond pas aux niveaux de décision définis ci-dessus.

[Sainfort et al. \[2005\]](#) proposent une étude comparant l'utilisation de méthodes de RO dans les problèmes de planification et d'ordonnancement entre les pays et suivant les modes de financement des systèmes de soin. Ils observent qu'une plus grande importance est accordée à leur optimisation dans les cas où une quantité suffisante de ressources est disponible. Ils s'intéressent particulièrement à l'émergence de centres de soins spécialisés, qui peuvent alléger la charge des hôpitaux généralistes et peuvent être mieux organisés parce que leur spécialisation implique une plus faible variabilité dans le traitement des patients. Ces établissements posent d'intéressantes pistes de recherche, pour l'estimation de leur impact et l'optimisation de leur

déploiement.

[[Araboui et al. 2007](#)] et [[Chahed et al. 2007](#)] traitent de la télémédecine et le soin à domicile (qui comprend l'hospitalisation, l'infirmerie et les traitements particuliers à domicile [[Chahed et al. 2004](#)]), pratiques rendues accessible par les nouvelles technologies de l'information. La chimiothérapie à domicile est plus particulièrement concernée. Ces pratiques innovantes offrent de nouveaux besoins, pour l'analyse, la modélisation, la simulation, la mise en place et l'amélioration des processus complexes et dynamiques de traitement à domicile. Ces problématiques de planification et de coordination des différentes ressources (humaines et matérielles) sont décrites. [Chahed \[2008\]](#) propose une cartographie des décisions qui illustre les relations entre les niveaux de décision correspondant à différents horizons temporels qui regroupent des problématiques liées à la pratique médicale, la logistique, la gestion de production, la gestion d'équipe ou encore la définition de stratégies générales.

[Bouchriha et al. \[2007\]](#) proposent une méthode pour la planification des visites de personnel médical au domicile de patients et l'appliquent dans un cas de tournées de visites à des patients atteints de pathologies respiratoires. Cette décision particulière soulève à elle seule un problème d'optimisation difficile (dérivé du problème du voyageur de commerce) résolu par des méthodes heuristiques. L'organisation de visites médicales soulève également des particularités dans l'organisation des tournées de véhicules [[Chahed et al. 2008](#)]. L'étendue des problèmes soulevés et des interactions entre les décisions laisse envisager que de nombreux travaux de recherche opérationnelle sont nécessaires pour apporter des réponses complètes aux problèmes d'organisation du soin, d'autant plus si l'on considère les avancées médicales et l'émergence de nouveaux outils de l'information et de la communication. [Rais and Viana \[2010\]](#), qui s'intéressent à l'étendue des problèmes soulevés et méthodes de résolution utilisées dans la production de soins en général, partagent cette vision d'un avenir prometteur de l'utilisation de méthodes de Recherche Opérationnelle en Santé.

[Kergosien \[2010\]](#) énumère les principaux états de l'art successifs concernant la RO appliquée au milieu hospitalier en général, depuis [[Fries 1976](#)], avant d'insister plus en détails sur les problématiques les plus traitées, à savoir l'ordonnancement et la planification. Il décrit également les méthodes utilisées pour les problèmes de tournées de véhicules, son travail de thèse consistant en l'optimisation du transport des flux de matières et de patients. Il y présente un moteur de simulation intégrant un ensemble de méthodes exactes et heuristiques pour traiter ces problèmes.

[Brailsford et al. \[2009\]](#) proposent un état de l'art récent de l'utilisation de certaines méthodes de recherche opérationnelle dans la santé. Vue la grande quantité de littérature à ce sujet, les auteurs proposent une méthodologie adaptée de l'échantillonnage par stratification. Les requêtes adressées aux bases de données JSTOR, SCOPUS et ISI WoK ont abouti à une sélection finale de 342 articles (parmi plus de 9000 initiaux), dont presque 46% ont été publiés entre 2000 et 2007. [Brailsford and Vissers \[2010\]](#) proposent une analyse quantitative des (1115) papiers présentés pendant les conférences d'ORAHS<sup>5</sup> de 1975 à 2009 ainsi qu'une comparaison des approches et domaines utilisés avec les résultats issus de [[Brailsford et al. 2009](#)]. Le classement des sujets et niveaux de leur application est effectué suivant un cadre d'étude adapté du cycle

---

5. ORAHS : Operational Research Applied to Health Services est un groupe de travail spécifique à l'utilisation de la recherche opérationnelle en santé qui existe depuis 1975.



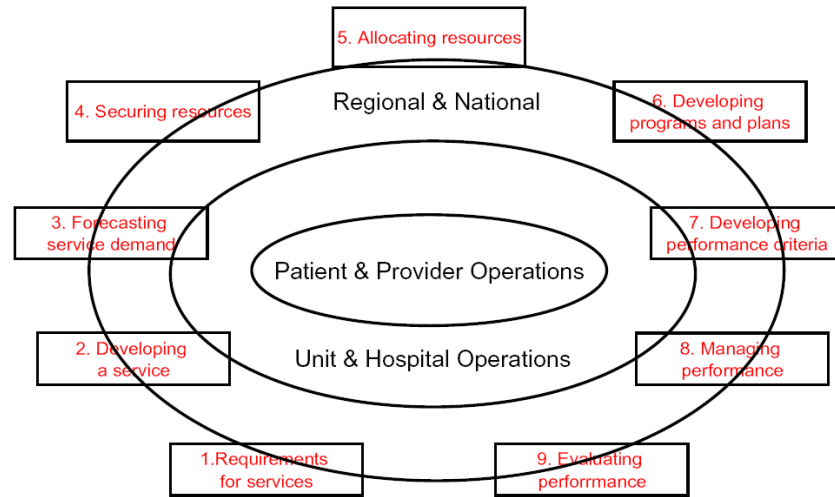


FIGURE 2.4 – Sujets et niveau décisionnel des études de Recherche Opérationnelle dans la Santé. (Issu de [Brailsford and Vissers 2010])

de vie des produits, comme préconisé par [Royston 1998], et le niveau de la prise de décision découpé en trois, comme proposé par Vissers [1998]. Ces deux niveaux de ségrégation des travaux sont représentés sur la figure 2.4. Les résultats indiquent que la gestion de la performance de dispensation est le sujet le plus étudié (près de 40% des communications), notamment au niveau d'un service / d'un hôpital. Vient ensuite l'étude de programmes pour l'utilisation des ressources et l'évaluation de la performance pour la dispensation. Les problèmes d'allocation des ressources et d'estimation de la demande sont beaucoup moins traités (7 et 5 %).

[Rais and Viana 2010] propose également un état de l'art récent à propos de l'utilisation de la RO en Santé. Cette étude permet d'observer la grande étendue des méthodes exactes et approchées utilisées dans les nombreux cas d'étude à travers le monde. Les problématiques organisationnelles décrites concernent notamment l'estimation du besoin, le dimensionnement et positionnement des centres de soins et des services d'intervention ou l'affectation des ressources.

L'étude rapporte notamment des travaux concernant la pratique médicale, incluant l'amélioration de méthodes de diagnostic, de planification des thérapies, les problèmes de transplantation et de prévention. Bien qu'elle compose moins d'une publication récente sur six concernant la RO en santé, la simulation y est décrite comme un outil puissant pour la planification et est utilisée en parallèle à différentes approches d'optimisation. Jun et al. [1999] proposent une explication à cette faible quantité, observant le fait que les outils de simulation modernes consistent de plus à plus à des opérations de "glisser-déplacer", ils estiment que les ingénieurs et consultants utilisant la simulation ne sont pas forcément publiant.

La section suivante concerne la simulation, "méta-outil" incluant de nombreuses approches.

## 2.3 La simulation

*"La simulation consiste à faire évoluer une abstraction d'un système au cours du temps afin d'aider à comprendre le fonctionnement et le comportement de ce système et à appréhender certaines de ses caractéristiques dynamiques dans l'objectif d'évaluer différentes décisions"* Hill [1993].

La simulation est un outil avec lequel on essaie de mieux comprendre un système, ou d'en prédire l'évolution sous différentes conditions. Cette définition concerne un ensemble de "simulations" allant de modèles déterministes à la simulation à événements discrets. Le terme simulation englobe en fait des approches mathématiques, informatiques et physiques (de mises en conditions). Simuler un système peut avoir différents objectifs, notamment pédagogiques, dans le sens où l'utilisation de la simulation peut avoir pour objectif d'aider à comprendre le fonctionnement et le comportement d'un système et ses caractéristiques dynamiques.

Cette description se retrouve dans la description, plus procédurale, proposée par Fishwick [1997], qui dit que les simulations informatiques impliquent de concevoir un modèle d'un système physique actuel ou théorique, d'exécuter ce modèle sur un ordinateur, et d'analyser les données produites.

Les études par simulation comportent les étapes décrites par cette définition, mais des propositions et conseils vont plus loin dans la granularité des étapes qu'une étude réussie peut devoir inclure. Ainsi, Law [2009] propose une approche en sept étapes pour conduire une étude par simulation :

1. Formuler le problème ;
2. Acquérir les données et créer un document de propositions ;
3. Vérifier la validité de ce document ;
4. Programmer le modèle ;
5. Vérifier la validité du modèle programmé ;
6. Effectuer les expérimentations et analyser les résultats ;
7. Documenter et présenter les résultats.

Ces recommandations ne sont pas sans rappeler celles proposées par Winston [1993] concernant la recherche opérationnelle en général. Le parallèle peut être fait en considérant que l'implémentation réelle des alternatives est ici leur implémentation dans la simulation. Les étapes de régression éventuelle dans l'avancement de l'étude sont dans les deux cas la vérification du modèle théorique, et la présentation des premiers résultats, qui sont ici la validation du comportement de la simulation.

Au travers de la description de ces étapes et de conseils et exemples, Law [2009] insiste sur l'importance des interactions nécessaires avec les commanditaires de l'étude et les protagonistes du système observé. L'auteur met en garde quant au fait qu'il peut ne pas y avoir une correspondance parfaite entre le modèle et le système étudié, suivant les objectifs de l'étude. Enfin, une section entière est consacrée à l'obtention de bonnes données d'entrée. L'acquisition de données de configuration est un problème rapporté par de nombreux auteurs, notamment dans le milieu hospitalier.



Sánchez [2007] s'accorde avec ce dernier point, rappelant que les données historiques peuvent être inaccessibles, ou à un coût élevé, et que l'objectif d'anticipation de l'évolution d'un système rend inévitable l'estimation de paramètres. L'auteur décrit une approche à adopter pour la modélisation de systèmes qui consiste en une addition incrémentale de ses caractéristiques et émet la possibilité de se passer de celles qui ne produiront pas d'effets mesurables afin de réduire la complexité du modèle.

La simulation (informatique) s'est grandement développée en parallèle à la facilité d'accès et la puissance des ordinateurs [Cartier and Forgues 2006]. Cartier and Forgues [2006] trouvent trois intérêts particuliers à utiliser la simulation pour les sciences de gestion. Le premier est qu'elle nécessite une formalisation des processus, et de retracer l'ensemble des étapes et décisions prises pour générer le système tel qu'il est. Une simulation de grande envergure peut nécessiter la description de certains processus informels et dévoiler certaines aberrations ou processus anti-productifs. Le deuxième intérêt principal est qu'une simulation permet d'approcher les conditions de l'expérimentation. Le troisième avantage majeur est d'"aider à la découverte". Il s'avère en effet parfois difficile d'observer in-vivo un ensemble de processus inter-reliés de manière non linéaire, comme le sont la plupart des processus sociaux. L'influence de règles de comportements individuels sur les résultats macroscopiques est parfois difficile à observer via un modèle mathématique, et une simulation adaptée permet de reproduire et mieux comprendre ces phénomènes.

### 2.3.0.1 Recommandations générales

Lowery [1996] présente les particularités de l'utilisation de la simulation dans le cas de systèmes hospitaliers. Différents arguments jouent en faveur de l'utilisation de modèles de simulation pour l'aide à la décision. Il est également important de noter que la conduite d'un projet de simulation peut permettre d'identifier des problèmes inattendus et sans rapport avec le problème originalement traité, même si l'implémentation de la simulation s'avère être un échec.

Henriksen [2008] propose un ensemble de recommandations qui visent à bien évaluer les besoins particuliers inhérents à chaque étude par simulation. Il décrit l'objectif du développeur de simulation comme la recherche de la maximisation de l'applicabilité, l'exactitude, la conformité, la facilité d'utilisation et la performance par rapport au coût et à la complexité. Cet objectif dirige vers une recherche de la réduction de la complexité ; l'auteur propose donc une série de 12 approches pour réduire la complexité, agrémentées d'exemples.

Sargent [2007] formule un principe similaire : KISS, pour "Keep It Simple, Sargent"<sup>6</sup>. Il cherche également à répondre à la question de la validation des simulations, qui est un problème pour lequel il n'existe pas de réponse formelle, et préconise de nombreuses "techniques" :

- L'utilisation d'animations visuelles qui permettent de vérifier la logique du fonctionnement et de la faire valider par des personnes connaissant bien le système ;
- Des tests d'altération du modèle, consistant en la vérification que le modèle réagit bien à des valeurs spécifiques en entrée ;

---

6. Ou "Keep It Simple, Stupid", suivant le contexte

- La validation des évènements, ou la vérification que le nombre d’occurrences des évènements correspond au nombre observé dans le système réel ;
- La logique des relations d’entrée/sortie et des conditions extrêmes ;
- L’utilisation de graphiques opérationnels, qui peut être effectuée pendant que la simulation est en train de se dérouler ;
- Le traçage d’entités ;
- Les tests de Turing, qui consiste en la présentation aux individus familiers des paramètres de fonctionnement du système d’ensembles de résultats issus de simulations et de données réelles afin d’observer à quel point (et pourquoi) elles peuvent les discriminer.

Un point important pour la validation des résultats issus d’une simulation stochastique est la variabilité des résultats. [Law and Kelton \[2000a\]](#) décrivent une méthode pour estimer le nombre de répliques à effectuer afin d’obtenir un niveau de confiance désiré, basée sur l’observation des résultats issus d’un premier ensemble de répliques.

Toute simulation est basée sur un ensemble de modèles quantitatifs / mathématiques / informatiques, qui comporte un aspect dynamique, c’est à dire qu’il comporte au moins une équation qui se réfère à au moins deux états temporels [[Kleijnen 2005](#)]. Ces modèles ne sont pas résolus analytiquement, mais ils permettent de retracer l’évolution des variables observées en fonction des données d’entrée, incluant les données externes comme la demande, mais également l’état du système observé, comme l’existence et la priorité de processus ou le nombre de ressources disponibles.

Le terme simulation regroupe, si l’on se réfère à sa définition, un large ensemble de techniques et méthodes, et ne se limite pas à l’utilisation de programmes informatiques. Les parties suivantes décrivent certaines de ces méthodes, adaptées aux études systémiques, parmi les plus connues. Suite à cela elles seront comparées au travers d’exemples d’utilisation qui en sont faites.

#### 2.3.1 Types de simulation et leurs usages principaux

Plusieurs types de simulation sont utilisés à différentes fins : le jeu, la démonstration, l’apprentissage et la compréhension, l’optimisation et l’aide à la décision. L’accomplissement de ces objectifs peut être recherché par des méthodes analytiques, informatiques et dans le cas de la prise en compte du facteur humain par la mise en situation dans un environnement réel ou virtuel.

L’utilisation de la simulation plutôt qu’une méthode analytique peut être due au fait que l’on ne peut pas (ou que très difficilement) prévoir comment le système fonctionnera sans prendre en compte l’enchaînement des processus, surtout lorsque leur bon déroulement est soumis à des décisions et évènements ayant un certain degré d’imprévisibilité et une relation de causalité entre sous systèmes.

La définition du terme simulation donnée par [[Hill 1993](#)] au début de ce chapitre regroupe en grande partie les méthodes décrites ci-dessous.

### 2.3.1.1 Mises en conditions : simulation *in situ* et jeux pédagogiques

Les principaux objectifs de ce type de simulation sont d'effectuer des tests et mesures dans des conditions proches du réel et d'apporter une possibilité de mise en conditions à différentes fins. Les intérêts majeurs de la mise en place de démonstrateurs et de projets pilotes pour le traitement de la problématique de l'intégration des technologies radio-communicantes sont de détecter les éventuels problèmes de faisabilité (environnement peu propice à la propagation des ondes) et d'acceptabilité (ne pas ajouter d'étapes trop contraignantes, estimer le temps de formation nécessaire à un éventuel nouveau matériel, le temps d'adaptation ...).

[Garnerin et al. \[2007\]](#) définissent les probabilités d'erreur de préparation en pharmacie et les origines de ces erreurs (étiquetage, copies manuelles, unités de mesure ...) à partir de l'observation des erreurs commises par des volontaires dans une "simulation à faible échelle"<sup>7</sup>. Les membres de l'expérimentation sont ici mis dans les conditions de travail pour observer les probabilités d'erreur, suivant le type de personnel, et les raisons de ces erreurs.

La validation d'un concept peut passer par sa mise en place dans un système reproduit ou en parallèle au système actuel de manière contrôlée. C'est le cas du pilote MISTRALS Biobanques, dans lequel on valide la faisabilité d'utiliser les RFID dans une tumorotheque en simulant le traitement d'échantillons avec les nouveaux outils tout en continuant à fonctionner en maintenant les protocoles et procédures précédents.

### 2.3.1.2 Feuilles de calcul

La modélisation des entreprises a été fort popularisée et a crédibilisé la simulation aux yeux de leurs responsables suite à l'introduction des tableurs. Le fort développement de la fouille de données (data-mining) et des outils de reporting de ces deux dernières décennies a donné naissance à des outils très complexes ; leur utilisation dans la gestion hospitalière n'est pas en reste.

### 2.3.1.3 Les modèles markoviens

Ils sont définis par le fait que l'évolution future de la chaîne ne dépend du passé qu'à travers la valeur présente. En associant des coûts à chaque changement d'état, on peut modéliser des problèmes comme les transferts de patients ou des temps d'attente de patients. Par exemple, [Rauner et al. \[2004\]](#) proposent d'adapter un modèle de Markov pour évaluer l'impact de mesures préventives du syndrome du pied diabétique.

### 2.3.1.4 Simulation à événements discrets (DES : Discrete-Event Simulation)

Ce type de simulation est le plus utilisé pour l'étude de systèmes de production de soins [[Brailsford 2007](#)]. La simulation à événements discrets suppose qu'il existe des dates auxquelles changent des valeurs qui peuvent influencer sur le comportement ultérieur du système et impacter le résultat. Le temps s'écoule instantanément entre deux événements, chaque événement doit donc être généré avec au moins un événement d'avance et intégré à la liste des événements.

---

7. "small-scale simulation"

Cette approche est particulièrement adaptée à une approche de modélisation des processus. On associe à cette approche plusieurs sous ensembles, différenciés notamment par la manière dont les entités sont capables d'interagir entre elles, avec leur environnement et avec un niveau décisionnel supérieur.

[Schriber and Brunner 1997] décrit le fonctionnement des logiciels de simulation à évènements discrets, et insiste sur l'intérêt de les connaître pour mieux identifier les origines possibles d'un dysfonctionnement, notamment au niveau de l'attribution des ressources, suivant l'outil utilisé.

[Balin and Giard 2007] décrivent la relation d'inclusion qui existe entre les *Items*, *Objets* et *Agents cognitifs*. Ces types d'entités ont des caractéristiques différentes qui définissent chacun un type de simulation, respectivement la Simulation Basée sur les Objets (SBO), Simulation Orientée Objets (SOO) et la Simulation Multi-Agents (SMA).

**Simulation Multi-Agents** Ferber [1995] définit globalement un agent comme "une entité physique ou virtuelle ayant les propriétés suivantes :

- (a) qui est capable d'agir dans un environnement,
- (b) qui peut communiquer directement avec d'autres agents,
- (c) qui est mue par un ensemble de tendances (sous la forme d'objectifs individuels ou d'une fonction de satisfaction, voire de survie, qu'elle cherche à optimiser),
- (d) qui possède des ressources propres,
- (e) qui est capable de percevoir (mais de manière limitée) son environnement,
- (f) qui ne dispose que d'une représentation partielle de cet environnement (et éventuellement aucune),
- (g) qui possède des compétences et offre des services,
- (h) qui peut éventuellement se reproduire,
- (i) dont le comportement tend à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences dont elle dispose, et en fonction de sa perception, de ses représentations et des communications qu'elle reçoit."

Certains attributs des agents mènent à une distinction entre les agents "cognitifs" et "réactifs" ; cette distinction possède plusieurs sous-niveaux qui dépendent de l'architecture et du comportement des agents. Elle implique un certain niveau d'autonomie, de capacité à accomplir individuellement des tâches et à les planifier.

Nealon and Moreno [2003] argumentent le fait que l'utilisation d'agents est adaptée aux problèmes relatifs au domaine médical, à cause de ses caractéristiques. Les systèmes orientés agents et systèmes multi-agents ont été utilisés pour des sujets proches de ceux que nous avons soulevé précédemment, comme la diffusion de technologies [Spielman 2005], [DeMarco et al. 2009] ; l'évaluation de pratiques médicales pour le traitement de diabétiques [Paranjape and Gill 2010] ; la gestion des données reçues par un centre de contact médical [Koutkias et al. 2005] ; l'évaluation de l'impact des RFID dans les magasins de détail [Montreuil et al. 2005]. Concernant le cas particulier de la santé, Isern et al. [2010] proposent une revue de la littérature entre 2002 à 2008 de l'utilisation d'agents dans la santé, observant des cas de gestion des données médicales, d'aide à la décision, de planification, de télésanté et de systèmes composites.

**Simulation Orientée Objets** [GregLomow and Baezner \[2008\]](#) décrivent la simulation orientée objets comme un programme orienté objets qui inclut trois concepts particuliers : les *entités*, formes d'objets actifs, les *événements*, qui sont des points d'étape où des états d'une ou plusieurs entités sont modifiés, et *l'heure de la simulation*, qui dispose de son échelle propre indépendamment de l'heure réelle. Il décrivent quatre points importants de la définition d'une simulation orientée objets : l'identification des processus physiques formant le système qui est simulé ; la définition de classes d'entités pour modéliser chacun des processus physiques ; l'identification de toutes les circonstances pouvant mener à une modification d'état du système et la détermination des paramètres d'occurrence des événements pour les adapter à l'horloge de la simulation. Ils présentent ensuite un ensemble de classes en C++ pour la génération de simulations orientées objets parallèles, c'est à dire adaptés à un déroulement sur plusieurs processeurs en parallèle.

Pour [Balin \[2007\]](#), les objets sont des entités qui ont la capacité de communiquer entre eux. Une simulation Orientée Objets (OOS) inclue des relations de communication directe, des comportements individuels et permet la simulation de réactions à des situations indésirables.

**Simulation Basée sur les Objets (SBO)** Les *Items* composant la Simulation Basée sur les Objets sont incapables de communiquer entre eux, les ressources et entités dans un même état y sont interchangeables. [Balin \[2007\]](#) définit ce type de simulation comme *"une variante restrictive de la Simulation Orientée Objets qui ne possède pas les propriétés d'héritage et de polymorphisme, qui donne un accès limité à son langage de programmation et qui offre à l'utilisateur un nombre limité de composants de base, permettant la construction modulaire d'une simulation"*.

L'auteur estime que les simulations commerciales (Arena, Simul 8, Promodel...) sont des logiciels de SBO, c'est à dire qu'elles n'ont notamment pas la capacité de modéliser des ressources portables mobiles et n'incluent pas la notion de localisation. Nous pouvons émettre une réserve quant à cette description quelque peu restrictive. Nous verrons notamment dans le chapitre 3 qu'il est possible d'intégrer un aspect de localisation à un logiciel comme Arena, bien que celui-ci ne soit pas basé sur un langage de programmation orienté objets. Les ressources mobiles peuvent quant à elles être modélisées sous forme d'entités qui seront regroupées avec un transporteur.

### 2.3.1.5 Systèmes Dynamiques (SD)

Par définition, les Systèmes Dynamiques ne permettent pas d'observer des entités individuelles. Ces modèles sont composés de variables continues dont on observe la variation, qui dépend de taux de passage d'un état à un autre, qui lui-même dépend des autres valeurs. Ce regroupement des entités en masses a des avantages et des inconvénients. Deux principaux atouts sont avancés par [Seila and Brailsford \[2009\]](#). Le premier point avancé est la rapidité d'exécution, notamment due au fait qu'il n'est pas nécessaire de lancer plusieurs itérations pour obtenir des résultats stables. Le second point intéressant est le fait que "la structure détermine le comportement". [Stringfellow et al. \[2009\]](#) et [Rauner and Schaffhauser-Linzatti \[2002\]](#) utilisent la simulation par systèmes dynamiques pour observer l'influence sur les risques de la modification de la politique de remboursement des conséquences d'événements indésirables, en parallèle

au besoin pour les hôpitaux d'accroître leur productivité.

L'utilisation de SD peut être comparable à la simulation à événements discrets dans certains cas, mais l'aspect visuel d'entités unitaires sera dans ce cas manquant pour, par exemple, valider avec les protagonistes du système de production la réalisabilité du scénario observé.

**2.3.1.5.1 Simulation multi-niveaux** Une simulation multi-niveaux est en fait un ensemble de simulations interagissant entre elles. Potentiellement de types différents, l'intérêt de leur utilisation est de pouvoir modifier des paramètres d'un modèle de manière dynamique, en utilisant un autre modèle dont les résultats serviront de paramètres pour la suite du déroulement. Cela nécessite un certain niveau de relations entre les paramètres des différents niveaux de simulation. Cette méthode a un intérêt évident pour l'étude de l'implémentation de systèmes communicants. Une simulation à un niveau mésoscopique intégrant un environnement virtuel (une représentation physique 3D) pourrait par exemple invoquer un modèle de simulation à éléments finis qui vise à évaluer la (non) lecture d'un tag positionné sur une unité logistique censée être automatiquement lue lors de son passage dans un portique (voir par exemple le logiciel de [Qtrac \[2006\]](#)). Ce scénario a été maintes fois observé dans différentes conditions et en différents lieux *in situ* par des fabricants de lecteurs ou revendeurs et intégrateurs de solutions. La principale difficulté quand à la création d'un tel ensemble de simulations est de représenter avec une assez bonne granularité des modèles physiques qui interagissent. Le fait que l'environnement dans lequel les communications sans fil doivent avoir lieu est important rend la création d'une simulation en un lieu particulier et son observation très consommateurs en ressources et en temps. L'accès aux données concernant les matériaux utilisés pour chaque partie de la zone à modéliser s'avèrerait certainement difficile. La globalisation d'un formalisme tel que le *Physical Modeling Language* (PML), proposé par [PhysicalMarkupLanguage \[2002\]](#) pourrait être une étape importante facilitant la création de simulations de ce type destinées à être reconfigurées facilement.

D'après [\[Gaud et al. 2008\]](#), la majorité des modèles multi-niveaux ont un nombre fixe et limité de niveaux de simulation ; les simulation à deux niveaux (micro- et macro-, méso- et macro-, méso- et micro- scopiques) étant les plus largement répandues.

### 2.3.1.6 Simulation par éléments finis ; simulations morphologiques / Émulations

L'émulation est une forme particulière de la simulation. L'origine du terme émulation provient de l'informatique, où il consiste à reproduire les fonctions d'un programme ou d'un matériel en simulant ses fonctions de bas niveau. Les objectifs d'une émulation réussie sont, comme c'est parfois le cas dans d'autres formes de simulation, qu'à la sortie du système émulé on observe les mêmes résultats qu'à la sortie de l'objet physique. Ce n'est pas forcément l'objectif d'études par simulation qui visent à comparer différents scénarios entre eux. On peut chercher à émuler un matériel ou un membre afin de l'intégrer à une étude par simulation, comme le montre l'étude suivante.

[Ayache et al. \[2009\]](#) proposent un aperçu général sur l'élaboration de modèles physiologiques et physiopathologiques. Les objectifs sont la compréhension du fonctionnement, l'anticipation de la conséquence de soins et la dosimétrie personnalisée par simulation, comme l'illustre l'exemple de [Serresant et al. \[2005\]](#).



Un cas particulièrement intéressant de cette étude concerne l'estimation de la faisabilité des communications radio, au travers de modèles de simulation à éléments finis, et l'aide au positionnement au travers de logiciels comme l'"*instant EPC hotspot*" [Qtrac 2006].

Des modèles concernent les deux domaines que sont la Santé et la physique magnétique. Ils ont notamment été développés afin d'observer l'impact des technologies RFID sur le corps humain [Arumugam and Engels 2009], [Hohberger and Tsirlin 2009], comme nous l'avons rapporté dans la section 1.2.2.2.

### 2.3.1.7 Réalité virtuelle et réalité augmentée

Proches de la mise en conditions, les réalités virtuelle et augmentée ont un fort potentiel pédagogique, d'évaluation et d'assistance. Ils permettent une valorisation supplémentaire à l'émulation de systèmes, vivants ou non. L'utilisation est particulièrement adaptée à la médecine chirurgicale, où l'on a un intérêt particulier à faire répéter les gestes sur des mannequins, tout ou partie virtuels et à améliorer l'immersion dans le cadre de téléchirurgie [Ayache et al. 2009]. L'étude de Kahol et al. [2009] est un exemple intéressant de l'utilisation d'un simulateur, qui montre à la fois un intérêt pour l'utilisateur mais également pour acquérir des observations qui permettront de dissocier les aspects physiques des aspects cognitifs des processus dans la rapidité de l'apprentissage. Nous décrivons plus précisément les aspects de l'apprentissage dans la section 4.3.3.2.

### 2.3.1.8 Comparaisons de différentes méthodes de simulation

Kleijnen [2005] décrit et compare les quatre principales approches de simulation pour l'étude de chaînes logistiques : la simulation sur tableur ("spreadsheet simulation"), la dynamique des systèmes ("system dynamics"), les systèmes dynamiques à événements discrets ("discrete-event dynamic systems") et les jeux d'acteurs / mise en conditions ("business / management games").

L'utilisation de feuilles de calcul est décrite comme inadaptée car souvent trop simpliste et peu réaliste. On observe notamment une grande difficulté à lire et valider les modèles et définir les règles qui créent un état en fonction d'un précédent qui peut s'avérer être un véritable casse-tête. L'implémentation de différents scénarios nécessite de redéfinir ces équations, ce qui peut être très chronophage. Le niveau d'agrégation nécessaire à l'étude de chaînes logistiques interdit une modélisation précise du fonctionnement des systèmes observés et des interactions entre ses parties.

Borshchev and Filippov [2004] proposent de définir le type de simulation le mieux adapté au système étudié. Ils illustrent leurs recommandations concernant le niveau d'abstraction nécessaire au traitement de problèmes au travers de la figure 2.5. Ils comparent ensuite l'utilisation de différents paradigmes pour traiter un même problème et montrent que, bien que des études utilisant une approche par systèmes dynamiques, événements discrets basée sur les objets ou orientée agents puissent concerner un même sujet et aboutir à des résultats similaires, les approches de modélisation diffèrent suivant le paradigme utilisé. Enfin, l'article donne des exemples d'architectures multi-paradigmes.

Plusieurs autres études, comme [Chahal and Eldabi 2008], [Brailsford 2007], [Tako and Robinson 2010] comparent SD et DES, qui sont les deux méthodes les plus utilisées en santé,

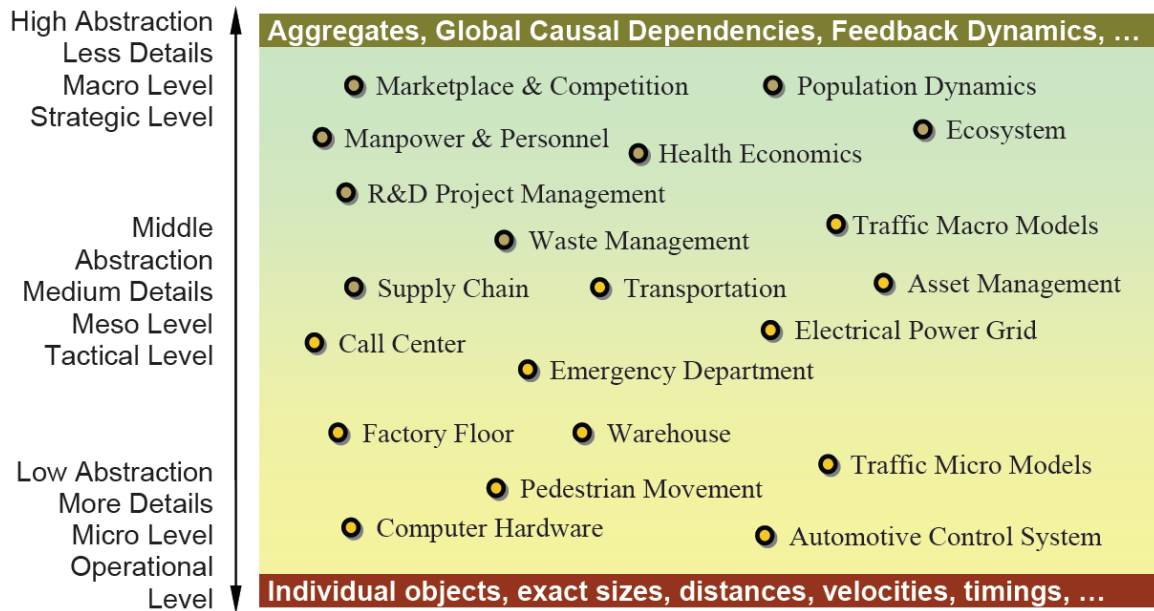


FIGURE 2.5 – Classification de problèmes traités par simulation sur une échelle d'abstraction croissante (vertical) et de l'aspect continuité (abscisse). (Issu de [Borshchev and Filippov 2004])

suivant de nombreux critères. Il en ressort que les SD manquent de l'aspect stochastique et de la flexibilité des DES, mais comportent l'avantage de nécessiter moins de données et de temps d'implémentation. Brailsford et al. [2010] cherchent à montrer l'intérêt de combiner les deux méthodes au travers de deux études de cas, ce qui est l'une des perspectives émises par plusieurs revues de littérature citées précédemment.

## 2.4 Conclusion

Nous avons décrit les systèmes hospitaliers et de prodigation de soins comme étant des systèmes sociotechniques complexes, dont la performance est difficilement mesurable. Les poids émotionnel, sociétal et le partage des responsabilités rendent difficile la réforme stratégique de grande envergure, mais également la conduite de changements tactiques et les décisions organisationnelles.

L'une des principales spécificités du milieu de la Santé réside dans le fait que les actions de la chaîne de production de soins est un mélange entre la production de biens et de services, où donc les activités incluent des relations humaines. Aussi la granularité d'une simulation visant à observer les impacts de l'utilisation de nouvelles technologies auto-communicantes au niveau des objets devrait être celle de la chaîne logistique, où les produits, matériaux et humains se déplacent, sont transférés et/ou transformés.

Une autre facette de l'étude de la mise de place d'un système de radiocommunications est l'aspect physique très contraint. Des outils existent pour simuler les phénomènes physiques entrant en jeu dans la communication par radiofréquence. Ce travail ayant été intégré à des projets visant à la mise en place de pilotes RFID, la modélisation de l'aspect physique des commu-



nications n'est pas un objectif de notre étude, pour laquelle nous simplifierons cet aspect ou considérerons une technologie parfaite. Il est toutefois intéressant de noter que de tels modèles existent.

La description de certains de ces facteurs de dégradation de la performance et la prise en compte d'une certaine dimension sociale, comme l'acceptation de l'utilisateur de nouvelles technologies, tentent à utiliser un modèle de comportement humain élaboré. Certains modèles permettent en effet d'inclure différents profils psychologiques [Bosse et al. 2009], et il est possible d'intégrer certains de ces modèles en utilisant des paradigmes comme la simulation multi-agents ou une simulation à plusieurs niveaux.

L'implémentation de nouvelles technologies de communication et de traçabilité telles les RFID permet nombre d'applications et modes de fonctionnement innovants. La multitude des possibilités techniques et des applications peuvent rendre des expérimentations *in vivo* coûteuses pour une expertise finalement trop peu généralisable. On peut donc trouver un intérêt à utiliser un mode d'expérimentation répétable et reconfigurable pour lequel les observations précises peuvent s'effectuer à plusieurs niveaux. L'évolution de la qualité des simulations et de la puissance de calcul peuvent permettre d'espérer tirer d'une simulation une qualité d'analyse et d'estimation des performances aussi bonne et éventuellement plus complète que celle que l'on observerait via un pilote. Des expérimentations et mises en conditions restent toutefois nécessaires à la configuration dudit modèle dans les conditions réelles. Une part importante de la réussite d'un projet d'intégration de technologies réside dans l'implication des acteurs concernés dès la définition des objectifs du projet et à sa présentation.

Nos deux cas d'étude peuvent se positionner sur la figure 2.5 à l'intersection de plusieurs sujets inclus dans ce tableau. Toutes deux nécessitent un assez faible niveau d'agrégation. L'étude consacrée aux biobanques, section 3, inclut des aspects de gestion de stock (*warehouse*), de centre d'appel (*call center*) du fait d'une charge de travail très variable, et dans une moindre mesure de gestion du personnel (*manpower*) et d'ateliers de production (*factory floor*). Les travaux réalisés à propos de la réorganisation de la livraison des produits chimiothérapeutiques, section 4.2, ont un fort aspect logistique (*supply chain*) et de production ; alors que l'étude de la production des chimiothérapies, section 4.3, est à positionner entre la gestion d'un atelier et de ressources humaines. Nous utiliserons donc pour ces études une approche de simulation à événements discrets basée sur les objets.





## Chapitre 3

# Étude de l'impact des technologies RFID sur la gestion des tumorothèques

Ce chapitre décrit l'étude menée concernant l'utilisation des RFID dans les biobanques. L'un des pilotes mis en place dans le cadre du projet MISTRALS (voir Section 1.3) concerne l'implémentation de ces technologies dans les biobanques. Deux structures hospitalières partenaires de ce projet : la tumorothèque de l'Institut Paoli Calmettes et la biobanque commune CHU-CAL de Nice. La section suivante rapporte la description des activités d'une biobanque, effectuée à partir du cahier des charges MISTRALS, réalisé en collaboration avec ces deux centres et précisé suite à des discussions et observations dans leurs locaux. La section 3.2 décrit ensuite un ensemble de possibilités de dysfonctionnements, en parallèle avec les solutions et améliorations ponctuelles pouvant être apportées par les technologies RFID. Elle se conclut par la description de la solution retenue et des innovations dédiées à la mise en place de ce projet-pilote. Vient ensuite une section dédiée à l'activité qui consiste en la concaténation des unités de stockage. Marginalement définie dans les biobanques, sa mise en place est extrêmement facilitée, pour ne pas dire rendue possible, par l'utilisation de technologies d'auto-identification. Nous y définissons les problématiques d'optimisation soulevées par cette activité et proposons des algorithmes visant une application efficace d'un cas spécifique. La section 3.5 décrit précisément l'étude par simulation menée, incluant les scénarios observés, les indicateurs de performance retenus et les résultats avant une conclusion du chapitre proposant des perspectives de recherche.

### 3.1 Description du fonctionnement d'une biobanque

Cette section décrit les étapes apparaissant au sein d'une tumorothèque, telles qu'elles ont été présentées aux partenaires du projet MISTRALS par la tumorothèque de l'Institut Paoli Calmettes et la biobanque commune CHU-CAL de Nice. Cette description est commune à ces

---

Les travaux présentés dans ce chapitre ont fait l'objet d'une soumission intitulée "IMPACTS OF RADIO-IDENTIFICATION ON CRYO-CONSERVATION CENTERS" [Housseman et al. 2011], acceptée pour publications dans le journal *Transactions On Modeling And Computer Simulation (TOMACS)* édité par l'Association for Computer Machinery (ACM) en Novembre 2010.

deux structures et assez générique. Le scénario d'usage décrit les processus subis par un prélèvement dans une biobanque, sans décrire précisément les protocoles de transformation pouvant être pratiqués dans différents établissements. Son intérêt réside en la possibilité de transposer le modèle d'analyse des processus et les résultats obtenus à d'autres biobanques ; de fait, l'étude basée sur cette description est applicable à d'autres structures du même type. Pour cette raison, le modèle de simulation que nous présentons a été créé dans la perspective d'être en grande partie reconfigurable avec la possibilité de le modifier aisément. Nous décrivons donc dans cette section les processus subis par les prélèvements au sein d'une biobanque en général et distinguons brièvement certaines particularités de fonctionnement. Il est à noter que les scénarios incluant l'utilisation des RFID supposent que les produits entrants sont taggés, et qu'une partie des coûts d'implémentation se voit donc partagée entre les services en interaction.

Six étapes critiques ont été identifiées, dont deux hors des structures étudiées, pour lesquelles une attention particulière doit être portée sur la traçabilité et l'identification des différents types d'échantillons. Ces processus sont représentés dans la Figure 3.1. Le premier correspond au prélèvement d'une pièce opératoire ou d'un échantillon sanguin (1) ; cette étape induit implicitement la préparation du chariot destiné à la salle d'opérations, l'édition de fiches de renseignements, l'opération (qui peut être une simple prise de sang), puis l'envoi du ou des échantillons au laboratoire d'analyses et/ou de conservation dédié, dans notre cas une tumorothèque. Suivent les processus internes à la biobanque, qui nous intéressent donc plus directement : la réception des prélèvements (2), la transformation (3), la conservation (4), puis le traitement d'éventuelles demandes de cession (5). La réception par l'utilisateur de l'échantillon transformé (6) peut être effectuée dans de nombreuses circonstances en une variété de lieux. Le transport est principalement assuré par un coursier spécialisé ; les fiches de renseignements incluant des détails relatifs à la pathologie et des informations phénotypiques du patient doivent être jointes au colis. Les acteurs pris en compte dans les étapes internes à la biothèque sont : les techniciens, que nous ne différencierons pas suivant leur spécialisation, et les médecins anatomo-pathologistes. Les transporteurs, analystes et clients n'apparaissent pas directement dans le fonctionnement interne des biobanques, bien qu'ils interagissent avec elles ou leurs échantillons.

La première étape est le prélèvement d'une pièce opératoire ou d'un tube de sang, c'est là que débute le processus de traçabilité de l'échantillon. Lorsqu'une pièce opératoire est prélevée, deux tubes sanguins doivent être également prélevés, si possible avant le début de l'acte chirurgical. Le prélèvement peut avoir lieu dans des laboratoires ou blocs opératoires, internes ou externes à l'établissement dont dépend la biothèque. C'est une opération qui a lieu à l'extérieur de la biobanque, elle ne sera donc prise en compte que très grossièrement dans cette étude. Il existe une probabilité d'erreur d'identification du patient à cette étape. Une probabilité d'asynchronisation entre la réception d'un prélèvement et de sa fiche de renseignements peut également mener à des confusions. Les paramètres influant sur ces probabilités sont indépendants de ce qui se passe au sein des biobanques.

Le transport des prélèvements doit respecter certaines conditions de délai, de conditionnement et de température. Il est effectué par air comprimé via un pneumatique lorsque c'est possible ou par un coursier (qui peut se révéler être un infirmier) ; il peut donc y avoir plusieurs zones de réception dans une biothèque. Le technicien se chargeant de la réception doit systéma-

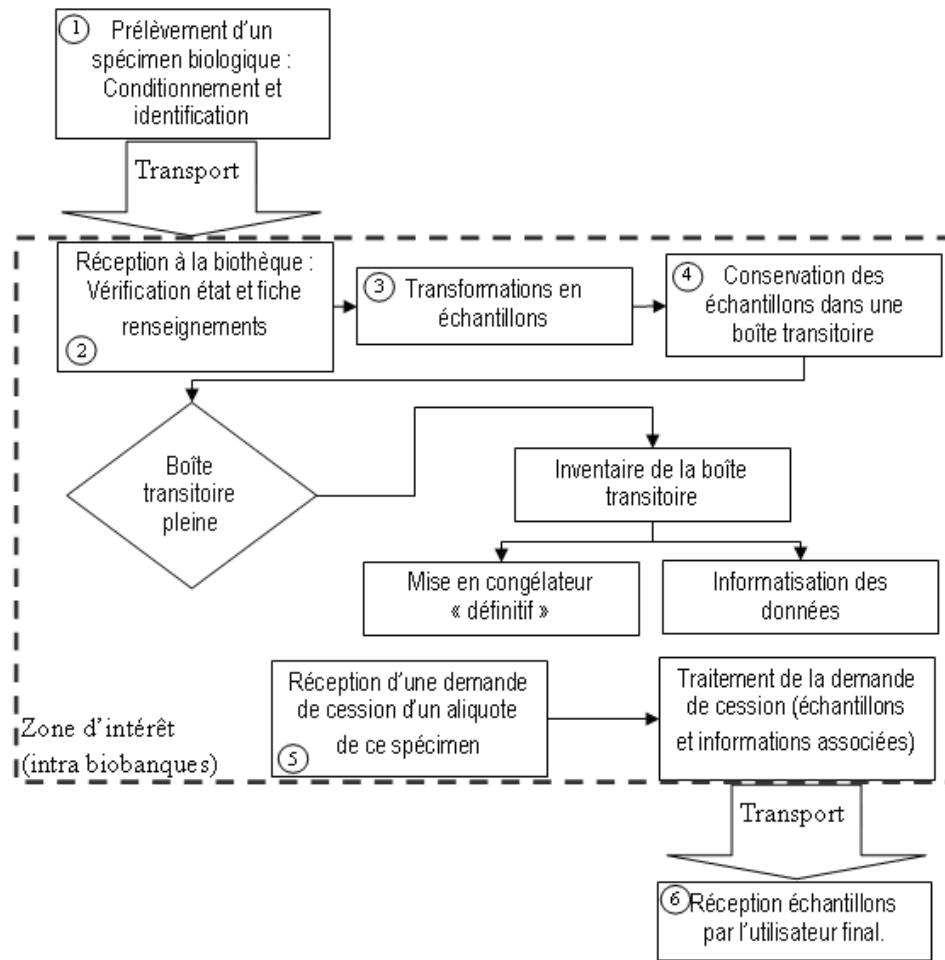


FIGURE 3.1 – Diagramme des processus Biobanque

tiquement vérifier l'intégrité du prélèvement ainsi que la présence de la fiche de renseignements relative à la pièce opératoire. Cette fiche contient notamment l'Identifiant Permanent du Patient (IPP), qui servira pour le retour d'informations en cas d'analyses pour diagnostic par exemple. Il n'est actuellement pas possible de retrouver avec certitude les informations de temps, température ou autres contraintes (chocs subis, niveau d'exposition à la lumière, quantité d'oxygène ambiant, etc.) auxquelles les échantillons ont été soumis depuis le prélèvement. De même, la fiche de renseignements peut avoir été remplie à la main, ce qui implique une probabilité d'erreurs de copie et / ou de relecture à la réception.

Dès leur arrivée dans la biothèque, les prélèvements sont associés à un identifiant interne et un autre identifiant (numéro de congélation) est attribué aux futurs échantillons transformés suivant les demandes émises. Ensuite, suivant les modes opératoires et protocoles établis, les médecins et techniciens vont procéder aux transformations désirées afin d'obtenir l'ensemble des échantillons à conserver et à transmettre. Cette étape débute avec le repérage puis la séparation des zones "intéressantes" (tumORAles) et péri-lésionnelles. La différenciation entre échantillons

de zones saines et de zones pathologiques se fait, dans plusieurs établissements, par la couleur du bouchon du tube contenant l'échantillon. On peut imaginer que les bouchons de deux tubes soient malencontreusement inversés, ce qui peut porter atteinte à la sécurité de manipulateurs en cas d'accident, et mener à des erreurs d'analyse ou à l'utilisation de données erronées dans des projets de recherche.

Les transformations peuvent s'étaler sur plusieurs jours, impliquant des manipulations par différents acteurs. Par exemple, pour le processus de culture cellulaire qui dure jusqu'à cinq jours, plusieurs cultures peuvent être réalisées conjointement ; des problèmes d'isolement et d'identification des cellules peuvent alors apparaître. Les échantillons du même type issus d'un même prélèvement composent un ensemble d'aliquots auquel est associé un unique numéro de congélation. Chaque échantillon est alors unitairement identifié par cet identifiant et son numéro d'aliquot.

Une fois transformés en échantillons utilisables et correctement conditionnés, les produits biologiques sont stockés. Le stockage s'effectue dans différents conteneurs : blocs de paraffine, sacs plastiques accueillant des pièces fixées au formol, boîtes de cryotubes pour conservation à basses températures (principalement 81 ou 100 tubes par boîte). Ces contenants seront ensuite conservés dans des armoires, ventilées ou non, ou rangés dans des "racks" (en plastique ou en acier) pour congélation. La conservation à basse température s'effectue dans des tanks à azote liquide ou gazeux, jusqu'à  $-196^{\circ}\text{C}$ , ou des congélateurs mécaniques à  $-80^{\circ}\text{C}$ . Avant d'être stockés à froid, les échantillons passent par une étape de stockage transitoire. Nous appellerons **nbCt** le nombre d'emplacements de cryotubes dans une boîte. Pour des raisons de commodité, les échantillons sont souvent classés par nature et suivant les procédures qu'ils ont subi.

Suite à cette période de stockage transitoire, les échantillons sont stockés définitivement après inventaire de la boîte dans laquelle ils sont. Cet inventaire est réalisé dans le but de relever le positionnement des cryotubes dans la boîte sur une fiche qui permettra de renseigner le système d'informations. Dans un objectif de qualité, c'est-à-dire éviter les erreurs d'inventaire (même si la double vérification n'est pas efficace à 100% [Bonnabry 2007]) et réaliser l'opération aussi rapidement que possible (pour éviter toute dégradation des échantillons), cette étape est effectuée par deux techniciens simultanément. Les actions réalisées sont : prendre un échantillon dans la boîte, en lire le code identifiant (numéro ou code barres), copier l'emplacement (numéroté de 1 à nbCt) dans le Système d'Informations (SI) via code barres ou sur la fiche de renseignements de la boîte, et reposer l'échantillon dans son emplacement. Cette opération est répétée pour chaque ensemble d'aliquots ; ceux-ci étant positionnés côte à côte, il suffit de compter le nombre d'aliquots pour économiser un temps non négligeable, bien que ce ne soit pas la plus sûre des procédures. Notons que même dans le cas d'un marquage par code-barres, la présence de givre mène souvent les manipulateurs à préférer le relevé visuel des numéros d'identifiant. Leur localisation est entrée manuellement dans la base de données par les techniciens, ce qui peut être, une fois de plus, facteur d'erreurs de recopie de données. Des erreurs à ce niveau peuvent mener à des pertes de temps considérables, lors de demandes de cession ou d'analyse.

Si un demandeur externe désire disposer d'échantillons, il doit établir un contrat avec la biobanque, joignant à sa demande une fiche descriptive de son projet de recherche. Celle-ci inclut les titre, contexte, descriptif, objectifs, méthode, résultats attendus et besoins du projet de recherche. Les échantillons identifiés comme utiles ou à exclure, ainsi que les obligations

du demandeur et de la biothèque (délais, confidentialité, contreparties ...) sont ainsi clairement définis. Nous rappelons qu'il est obligatoire de s'assurer que le patient n'a pas exprimé son opposition, ou a idéalement consenti à l'utilisation ultérieure d'échantillons issus de leur anatomie [Borella et al. 2010] [Hofman et al. 2010]. Nos partenaires nous ont informé que 30% des patients donnent leur accord spontanément pour l'utilisation de leurs prélèvements, et que 60% ne répondent pas immédiatement ; ils seront dans ce cas recontactés à l'occasion d'une éventuelle demande de cession d'échantillons les concernant.

Lors de la réception d'échantillons par l'utilisateur final, il est important qu'à chaque cryotube soit associée la fiche d'informations le concernant. Les informations demandées relativement à chaque échantillon peuvent être nombreuses suivant son utilisation, et si les informations phénotypiques jouent un rôle important dans la recherche pharmaceutique, le numéro d'IPP peut s'avérer capital lorsque l'objectif est d'affiner ou de confirmer un diagnostic. Le fonctionnement des biobanques peut donc être comparé à un système sociotechnique de production (transformation d'un prélèvement brut en ensemble d'échantillons utilisables) et de gestion d'un type de stock particulier, puisque nécessitant le respect d'une chaîne de froid extrême pour la majorité des cas. Ce dernier point pose problème pour la réattribution d'emplacements vides dans les boîtes de cryotubes, la manipulation des boîtes impliquant forcément un risque de dégradation des échantillons qu'elle contient.

Ce système sociotechnique de production de services de collecte, de stockage, de transformation et d'analyse de prélèvements biologiques est une partie de la production de soins dont l'environnement de travail n'est pas dénué de risques. Le passage par ces structures peut être une étape du diagnostic, du suivi de l'efficacité ou d'affinage d'un protocole de traitement, parties des plus importantes de la production de soins. Les temps de transformation, de recherche et d'analyse d'un produit peuvent s'avérer très variables, notamment dans un environnement où des failles de traçabilité peuvent exister. La section suivante décrit plus précisément les processus composant l'activité des biobanques, relève les éventuelles erreurs pouvant apparaître et décrit en quoi les technologies auto-communicantes peuvent les réduire.

## 3.2 Identification *a priori* de facteurs de risques et d'amélioration

Le pilote "MISTRALS BioBanques" vise l'intégration au sein de contenants d'échantillons biologiques (cryotubes, crachettes, etc.) de puces RFID. Outre le défi technologique de cette intégration, le développement de passerelles informatiques et la définition d'une solution généralisable sont des objectifs importants pour la réussite du projet. Les passerelles informatiques doivent permettre des communications entre les étiquettes et les bases de données des biobanques ainsi qu'un transfert des informations jusqu'à l'utilisateur final des échantillons. L'aspect généralisable signifie qu'il devra être possible d'adapter la solution à une autre biobanque avec un effort d'adaptation minimal.

Les décisions d'implémentation de solutions peuvent influencer sur la qualité à long terme du système et sur sa réactivité face à différents aléas. Dans cette partie, nous commencerons par décrire les apports généralement observés ou du moins attendus par l'implémentation d'objets



communicants dans des systèmes similaires. Nous reprendrons ensuite les étapes décrites dans le premier paragraphe et décrirons les apports attendus, que ce soit suite à la mise en œuvre du pilote "MISTRALS Biobanques", ou bien suite à l'implémentation d'autres dispositifs et modifications organisationnelles du système.

L'un des apports des technologies RFID par rapport aux codes à barres est le fait qu'il est possible de mettre à jour les informations de la puce. Cet apport technologique offre la possibilité de fonctionner en "mode dégradé" (panne réseau par exemple). Cette éventualité a toutefois un coût (coût de la puce dépendant de la mémoire et des systèmes de protection et du temps d'accès à ses informations, complexité des middlewares, nombre et qualité des différents lecteurs et antennes) loin d'être négligeable, mais qui prend toute son importance si on prend en compte la volonté affichée de voir prospérer rapidement une 'tumorothèque virtuelle nationale'. Le catalogue de données décrit dans [Borella et al. 2010] peut être intégré à la puce des cryotubes, et ainsi être associé physiquement aux échantillons, annihilant les éventualités d'erreurs d'inversion de fiches de renseignements lors d'échanges.

La lecture de l'étiquette électronique d'un produit ne requiert pas de ligne de visée optique, et la lecture de masse est rendue possible grâce aux techniques d'anticollision (voir section 1.2.1). Un apport direct des technologies sans contact est de réduire l'impact des conditions de stockage des échantillons. Il arrive fréquemment que du givre recouvre la partie lisible des codes barres, givre qu'il faut retirer pour lire sans erreur un chiffre manuscrit ou scanner le code barre avec un lecteur. Cet atout majeur des transpondeurs rend par exemple possible l'organisation d'inventaires à une fréquence inimaginable dans d'autres conditions, et implique un gain de temps considérable pour les manipulateurs. On pense notamment à l'étape (4), et plus précisément à l'inventaire de boîtes de cryotubes. Par contre, la lecture de masse ne permet pas de connaître l'emplacement des échantillons les uns par rapport aux autres ; cette fonctionnalité fait toutefois l'objet d'un brevet (numéro WO2006131674), en cours de dépôt par Tagsys, et fait partie de la solution "sur étagère" proposée par MainTag [MainTag 2008]. Cette dernière nécessite toutefois l'adoption de toute une gamme de produits, ce qui peut être très facilement réalisable pour de nouvelles structures mais pas pour d'autres qui fonctionnent depuis de nombreuses années et possèdent plusieurs dizaines de milliers d'échantillons dans leurs stocks ; remplacer leurs cryotubes, racks et boîtes de cryotubes n'est pas envisageable.

Relever des informations en "temps réel", voire automatiquement, est d'une grande importance notamment pour la gestion de stocks et le suivi logistique. Cet atout permet de mieux anticiper d'éventuelles ruptures de stock, et de réagir plus rapidement à d'éventuels problèmes ou questions comme l'emplacement actuel d'un produit. La précédente description de l'étape de cession laisse apparaître un léger décalage entre l'acceptation d'une demande de déstockage, le déstockage physique et la mise à jour de la base de données. Cette fenêtre de temps peut rendre imprécis le catalogue des ressources disponibles dans les centres de ressources biologiques dans le cas où ce catalogue se voudrait exhaustif, et les étapes de recopies manuelles sont toujours propices à erreurs [Park and Lee 2007]. Associer aux puces RFID des dispositifs comme des capteurs de divers types (température, lumière, pression, glucose, ...) est possible et peut être intéressant suivant le type de prélèvement. L'alternative évidente à ces solutions fort onéreuses est d'enregistrer dans la puce des états de capteurs mutualisés. La communication

bi-directionnelle à courte portée (NFC, ZigBee) [Sokol 2005; Benini et al. 2006] permet une plus grande précision des données remontées via d'autres canaux comme le WiFi, et donc la génération d'avertisseurs (sonores, visuels, courriels, sms ou autres) plus pertinents ainsi qu'un contrôle contextuel de dispositifs. Les informations améliorées, les possibilités d'automatisation et d'assistance logicielle sont accrues. L'apparition de normes de communication et éventuellement de normes non-propriétaires visant l'interopérabilité (EPC gen2, 15693\_18000-3) permet d'utiliser des solutions hybrides (*i.e.* utilisations de matériel et logiciels provenant de différents fournisseurs). L'adjonction de capteurs à des glacières réfrigérées communiquant avec les échantillons pourrait également faciliter les échanges entre bibliothèques et laboratoires, assurant un niveau de qualité des échantillons reçus via un transporteur conventionnel et réduisant à terme les coûts de transport. Ces systèmes de vérification qualitative ne font pas partie du projet-pilote MISTRALS mais pourraient en constituer une extension intéressante.

Les technologies RFID sont coûteuses, mieux vaut donc exploiter leur potentiel autant que faire se peut. La section suivante donne des précisions sur la définition exacte du projet-pilote MISTRALS.

## 3.3 Description de la solution proposée par MISTRALS

L'intégration des technologies de radio-communication dans les biobanques a pour principal objectif une traçabilité transparente, moins chronophage et théoriquement plus fiable. La définition de la solution à mettre en place a donné lieu à de nombreuses discussions, notamment quant à la localisation des informations. Les ingénieurs des sociétés partenaires du projet ont développé des prototypes spécifiques permettant l'amélioration du fonctionnement des biobanques désireuses de tagger leurs cryotubes à l'unité. Les attentes étaient de profiter des avantages du sans contact, à commencer par la lecture de masse. Cette section décrit en premier lieu les particularités de la solution retenue et en cours d'évaluation par les bibliothèques partenaires, ainsi que quelques propositions d'amélioration. Ensuite sera détaillée l'éventuelle intégration d'un processus de réaffectation d'emplacements libres, dont la généralisation est rendue possible grâce à un système d'inventoriage rapide et précis.

Les défis techniques principaux de ce projet sont :

- L'intégration aux différents types de cryotubes d'une puce respectant les impératifs de sécurité relatifs à l'environnement de travail ;
- La démonstration de la résistance de ces puces aux conditions extrêmes de stockage, et de la conservation des informations du tag à long terme ;
- La démonstration de l'amélioration à terme des échanges d'échantillons grâce à des cryotubes "intelligents" ;
- La proposition d'un ensemble de dispositifs pour l'amélioration du fonctionnement interne des biobanques.

Dans le cadre du projet, il est prévu que la traçabilité RFID ne débutera qu'au niveau des cryotubes, soit après réception des prélèvements initiaux. L'intégration de la solution pour le pilote se devant d'être non invasive, il a été nécessaire que les étiquetages électroniques et visuels (code barres et identifiant lisible) cohabitent. Dans ce but, la société Psion Teklogix a développé une station permettant d'associer les codes barres actuellement utilisés avec les



FIGURE 3.2 – Station d'association Tag/Code Barre, Psion.

étiquettes RFID. Cela permettra d'alimenter conjointement la Base de Données MISTRALS (BDM) et la base de données spécifique à l'établissement. Cette station (Figure 3.2) utilise un lecteur mobile pour lire simultanément le code barres et l'IDentifiant Unique (UID) de la puce et effectue leur association dans la BDM.

Afin d'exploiter au mieux les possibilités offertes par les nouvelles technologies, une étude préliminaire a été réalisée par les membres du consortium visant à déterminer à quels apports les technologies auto-communicantes pouvaient mener. Une grande importance a été attribuée à l'activité d'inventariage des boîtes, fort consommatrice en temps pour les ressources humaines et assez risquée car elle inclut plusieurs tâches propices à l'apparition d'erreurs. Une vérification possible aurait pu consister en l'utilisation d'une antenne 'basique' (raquette ou fixe) (3.3) pour vérifier que les données informatisées correspondent aux informations lues dans les puces. Les erreurs de retranscription seront ainsi détectées et une demande de vérification humaine pourra être lancée. La localisation précise de chaque tube dans les boîtes paraît plus avantageuse ; aussi, deux prototypes de dispositifs permettant d'inventorier rapidement les boîtes de cryotubes détectant leur position dans la boîte ont été développés par les sociétés partenaires. La solution de Psion Teklogix, société spécialisée dans la conception de lecteurs portatifs, consiste en une antenne longitudinale (Figure 3.4) qui permet de lire toutes les puces d'une ligne / colonne complète de la boîte sans lire celles de la ligne/colonne d'à côté. La manipulation consiste à faire glisser lentement cette antenne le long de la boîte (ou l'inverse), dans les sens de la longueur puis de la largeur. Le logiciel embarqué permet de recouper les informations afin de déterminer l'emplacement de chaque tube dans la boîte.

Le dispositif développé par Tagsys consiste en un ensemble de fines antennes conçues spécialement pour éviter toute interférence. L'activation asynchrone de ces antennes permet de connaître les positions X et Y de chaque tube lu, sans intervention humaine. L'éventualité de tagger également les boîtes de cryotubes aurait pu constituer un apport au niveau de



FIGURE 3.3 – Antenne générique, ne permettant pas le positionnement des tubes dans la boîte.



FIGURE 3.4 – Antenne d'inventariage assisté des boîtes de cryotubes. (*Credit : Psion Teklogix*)

l'"agrégation de l'intelligence" [Meyer et al. 2009], et un détrompeur supplémentaire de l'orientation de la boîte. Cela aurait également permis d'associer directement et sans saisie le numéro de boîte et l'ensemble des échantillons qu'elle contient.



FIGURE 3.5 – Antenne d'inventariage rapide des boîtes de cryotubes. (*Credit : Tagsys*)

Les résultats d'un premier pilote, en place au CHU de Nice depuis Aout 2010, seront observés à la fin de la phase d'expérimentation, prévue en Avril 2011. L'expérimentation concerne un faible pourcentage des échantillons transitant dans le site d'expérimentation. De plus, dans un souci de minimisation du risque, les processus de traçabilité classiques n'ont pas été réduits aux gestes RFID mais additionnés à ceux-ci dans l'enceinte de la biothèque. Cela implique qu'il sera difficile de quantifier avec précision l'ensemble des apports induits par la solution mise en place. Au niveau des points positifs, la solution implémentée dans le cadre de ce pilote intègre les processus de traçabilité dès le bloc opératoire, et l'éventualité de mettre en place un système similaire dans la seconde biothèque partenaire revint au goût du jour à la fin du mois de Novembre 2010. Tous les détails des expérimentations et des résultats associés seront sans nul doute publiés par les partenaires hospitaliers lorsque cela sera pertinent.

Les améliorations qualitatives et quantitatives de l'activité d'inventariage de boîtes d'échantillons biologiques peuvent aboutir à une optimisation du stock. Ceci impacte de manière non négligeable l'estimation du retour sur investissement, et éventuellement les coûts investis pour la création des antennes et logiciels y étant dédiés. Les réaffectations d'emplacements permettent de réduire le nombre de boîtes stockées pour un même nombre d'échantillons. Ce processus n'est dans l'état actuel (avant pilote) des choses que très exceptionnellement effectué ; c'est en effet une tâche génératrice d'erreurs, fastidieuse, qui met en danger l'intégrité des échantillons. Le coût de conservation d'une boîte est important, et l'augmentation de l'espace de stockage peut mener à de larges investissements. La section suivante décrit formellement cette activité de concaténation, marginale dans les biobanques, mais qui peut permettre de mieux rentabiliser l'adjonction de tags RFID aux cryotubes, la rendant acceptable sous certaines contraintes.

### **3.4 Réaffectation des emplacements de cryotubes conservés à l'azote**

Cette section traite du problème d'optimisation relatif au réarrangement (à la concaténation) des boîtes de cryotubes. Y sont définis les différents scénarios de manipulations possibles, les déclencheurs associés et les contraintes relatives à cette activité. Une description précise de l'algorithme utilisé pour le cas particulier paraissant le plus acceptable sera proposée, ainsi que des approches d'optimisation considérant certaines configurations, contraintes et objectifs associés.

#### **3.4.1 Liste des contraintes**

La contrainte majeure, celle là même qui fait que les réorganisations n'ont actuellement lieu que très exceptionnellement, concerne le temps d'exposition des échantillons à température ambiante. En effet, l'importance de la qualité des échantillons stockés est primordiale, et le risque de les voir se détériorer est important si le processus de décongélation est trop avancé. Nommons *StayFrozen* la contrainte relative à la limite de temps d'exposition des tubes à l'air libre acceptable, à laquelle on associe la variable  $T_{MAX}$  qui est le temps maximal d'exposition à

la température ambiante acceptable pour un produit étant dans son état stable de stockage. Le processus d'inventariage manuel est de longue durée (jusqu'à vingt minutes d'après la description métier) et comporte plusieurs étapes successives pour lesquelles les risques d'erreur ne sont pas nuls. Par conséquent, le processus de réaffectation n'a lieu que lors de cas extrêmes où des boîtes sont quasiment vides. L'utilisation de technologies permet d'inventorier des boîtes rapidement et avec la certitude d'avoir renseigné la base de données sans erreurs ; elle permet donc de concevoir une mise en pratique plus fréquente de la concaténation de boîtes.

Une deuxième contrainte importante, nommée *BoxPerType* concerne la gestion des boîtes d'échantillons. Une règle de fonctionnement impose que les boîtes doivent ne contenir qu'un seul type d'échantillons transformés. Cette règle découle notamment du fait que les cessions concernent souvent un même type d'échantillons. Les demandes de cession rapprochées de la date de réception du prélèvement sont fréquentes, et l'application de ce mode de rangement permet alors aux manipulateurs de retrouver plus facilement le tube recherché, connaissant la boîte transitoire dans laquelle il est censé se trouver. Un avantage de l'application de cette règle concerne également l'étape d'informatisation, pour laquelle une partie des informations n'aura pas à être réécrite car certains champs conservent la dernière information validée. L'éventualité de disposer d'armoires auto-communicantes et/ou un système d'information parfaitement fiable ne mènera pas forcément à rendre cette contrainte obsolète, car les demandes de cession concernent généralement des échantillons d'un même type. Regrouper les échantillons par type peut donc rester intéressant, rapport au temps de traitement des demandes de cession.

Une contrainte proche de la précédente concerne la proximité des échantillons au sein des boîtes. Le fonctionnement actuel veut que les aliquots d'un échantillon soient stockés côte à côte. La raison principale de cette règle est que lors du traitement d'une demande de cession pour un projet de recherche, on veut pouvoir s'assurer qu'il restera au moins un échantillon au bénéfice du patient. Leur proximité permet de s'en assurer lors de la préparation de commandes. La qualité de l'information dans un environnement auto-communicant autorise le fait de dispatcher les tubes dans différentes boîtes, et le système d'information de vérifier qu'il restera au moins un tube réservé au besoin d'analyses dans l'intérêt du patient. Il est possible de s'assurer physiquement que la contrainte originelle, le fait de ne pas 'vendre' le dernier échantillon d'un patient, est respectée en déformant cette contrainte. La nouvelle contrainte obtenue serait alors que les aliquots d'un échantillon soient stockés dans la même boîte. La position étant facilement trouvée par l'antenne RFID, vérifier la présence du tube manuellement ne nécessitera qu'une augmentation négligeable de la durée.

Une contrainte, qui n'a pas été implémentée, concerne la quantité d'azote dans l'air. Les cuves ouvertes dégagent en effet de la vapeur d'azote, qui va s'accumuler dans l'air de la salle de stockage. Une alarme se déclenche en cas de dépassement de la limite d'azote dans l'air, qui oblige l'évacuation en urgence de la zone de stockage. Le manque de données sur la rapidité d'oxygénation de la salle de stockage, la rareté actuelle du déclenchement de cette alarme, la possibilité de limiter la pollution atmosphérique facilement et la forte variabilité des valeurs suivant les établissements font que cette contrainte ne sera pas prise en compte.

### 3.4.2 Déroulement des manipulations, déclencheurs et objectifs

L'objectif de l'activité de réaffectation d'emplacements de cryotubes est de vider certaines boîtes, augmentant par conséquent la proportion de remplissage des autres. Cet objectif général peut être décliné sous plusieurs formes, et ce notamment selon le déclencheur ordonnant cette opération de réaffectation. La prise en compte du long terme modifie également la stratégie à adopter, la partie suivante proposera des méthodes de prise en compte du long terme dans la définition des manipulations d'une réaffectation, dont l'efficacité sera observée à la fin de ce chapitre.

Dans un premier cas, nous supposons qu'un créneau horaire est prédéfini et destiné à cette activité. Dans ce cas, on peut par exemple chercher à "maximiser le nombre de boîtes vidées dans un certain laps de temps". Nommons "*defTrigger*" ce déclencheur planifié. Un second cas sensiblement différent est le cas d'urgence où il est impossible de stocker une boîte alors que celle-ci devrait être mise en stockage définitif au plus vite. Cette situation d'urgence poussera plutôt à définir l'objectif sous la forme "minimiser le temps nécessaire pour vider un certain nombre de boîtes". Nommons "*emTrigger*" ce déclencheur d'urgence.

D'autres déclencheurs pourraient être à l'origine du lancement de l'activité de réaffectation d'emplacements de cryotubes. L'utilisation d'un indicateur de fragmentation et/ou l'estimation de la charge de travail (via un partage de données avec les services émetteurs de requêtes éventuellement) en sont deux exemples pertinents. Un cas particulier de déclencheur permettant de proposer des réaffectations efficaces est l'observation du fait qu'une boîte transitoire contient un nombre de tubes égal au nombre d'emplacements libres dans une autre boîte en stock. Les techniciens pourraient se voir notifier cette possibilité et décider d'accéder ou non à la proposition du système.

Quels que soient le déclencheur et l'objectif, des questions se posent quant à l'organisation des manipulations. Le scénario suivant a été retenu car il évite tout imbroglio, que ce soit au niveau de l'enchaînement des manipulations ou entre les manipulateurs :

- Un seul manipulateur se charge d'effectuer les manipulations ;
- Il déstocke l'ensemble des boîtes à manipuler ;
- Il effectue les transferts de tubes ;
- Il inventorie les boîtes non vides et les remet dans les cuves d'azote à l'emplacement spécifié.

La réduction partielle du contenu d'une boîte ne sera pas autorisée afin d'éviter tout risque de ne pas la re-stocker.

La figure 3.6 est une mise à jour du diagramme présenté au début de ce chapitre et issue de [Housseman et al. 2011] ; elle inclut les déclencheurs et l'activité de re-warehousing. Dans la zone grisée (R), partie majeure de cette mise à jour, la décision (R1) correspond au déclencheur *emTrigger* et (R2) à *defTrigger*.

La littérature est très limitée concernant l'activité de ré-affectation d'emplacements. [Garfinkel 2005] stipule que [Sadiq 1993] propose l'unique approche traitant ce problème d'optimisation incluant le coût de picking et de réarrangement des zones de stockage pour grouper les produits. Sadiq [1993] a développé une heuristique appelée "Stock Allocation Assignment



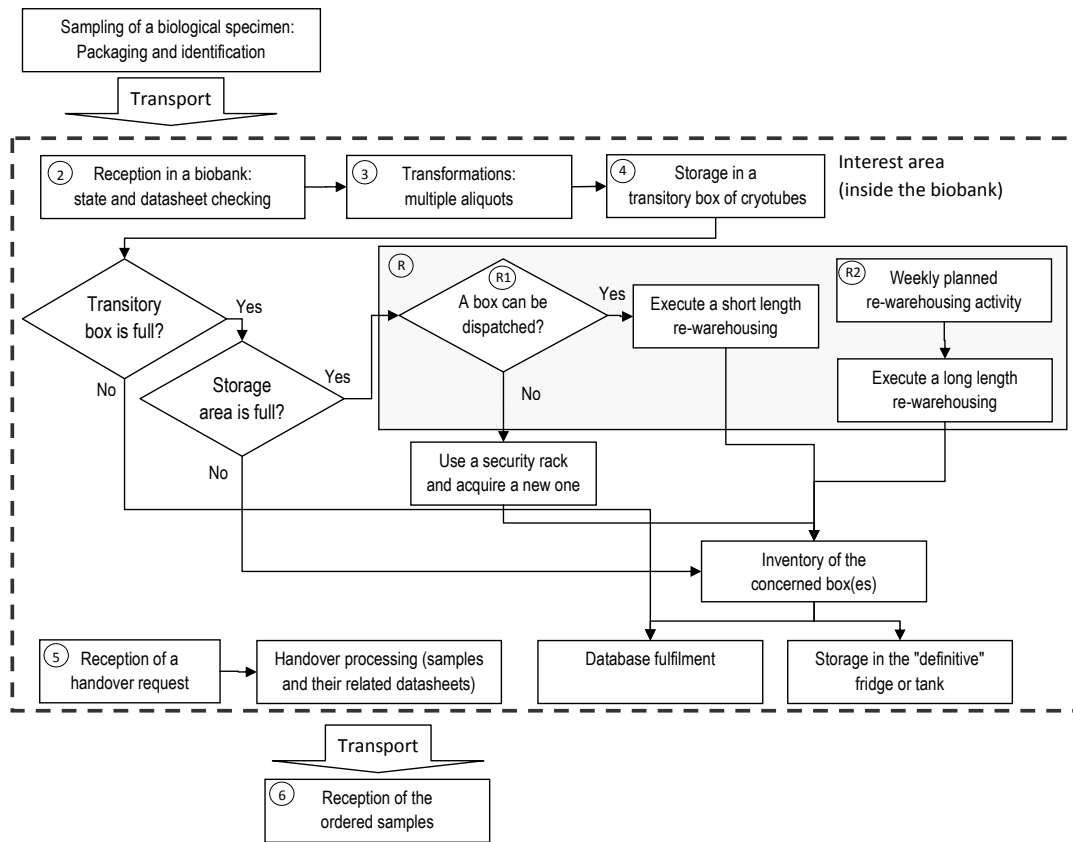


FIGURE 3.6 – Diagramme des processus intra-biobanque intégrant l'activité de re-warehousing

Algorithm". Celui-ci est basé sur l'algorithme de regroupements nommé HYCLUS, mais inclut la possibilité de déplacer des produits d'un groupe à un autre. La pauvreté observée de la littérature peut être due au fait que les entrepôts effectuent les opérations de réassignation et de partage d'emplacements de manière informelle, sans recourir à des algorithmes d'aide à la décision, suite à des décisions humaines. Les responsables de centres de distribution et de stockage peuvent parfois demander à leurs employés de concaténer des boîtes ou produits sur certaines palettes ou dans une zone donnée lorsque le nombre d'emplacements libres vient à manquer, que des ressources humaines sont disponibles ou en prévention de périodes de grande activité. La partie suivante décrit les observations relatives au problème de réallocation d'emplacements de cryotubes réduit au scénario défini ci-dessus.

### 3.4.3 Optimisation de l'activité de re-warehousing

Considérant le scénario des manipulations décrit précédemment, et suivant les deux objectifs identifiés (vider une boîte en un minimum de temps ou vider un maximum de boîtes en un temps donné), nous avons dégagé quelques propriétés permettant d'optimiser le processus de réaffectation des emplacements de cryotubes.

Pour rappel, le déroulement de l'activité se décompose en trois étapes majeures : sortir des



boîtes des tanks d'azote, déplacer des tubes, puis ranger les boîtes non vides. Cette troisième étape inclut l'inventariage des boîtes. Les décisions relatives à cette activité portent sur le choix des boîtes à manipuler, l'affectation des emplacements et l'ordre des manipulations. Les notations suivantes seront utilisées :

- $T_{Tube}$  est le temps nécessaire au déplacement d'un tube, d'une boîte à une autre ;
- $T_{Box}$  est le temps de manipulation d'une boîte, c'est à dire le temps qu'il faut pour la sortir d'une cuve à azote ou pour l'y ranger ;
- $T_{Inv}$  est le temps d'inventariage d'une boîte ;
- $T_{MAX}$  est le temps maximum d'exposition acceptable à température ambiante.

Dans un premier temps, on peut considérer que les temps de manipulation et d'inventariage des boîtes sont nuls ( $T_{Box} = 0$ ). Cette simplification ramène notre problème à un problème standard de sac-à-dos, où l'objectif est de sélectionner les boîtes permettant d'en vider un maximum. On choisira alors de vider les boîtes ayant le rapport entre poids (temps nécessaire) et valeur (vider n'importe quelle boîte rapportant un emplacement), c'est à dire celles pour lesquelles le temps de manipulation nécessaire est le moins important, donc celles qui comportent le moins d'échantillons.

**Propriété 1.** *Il est préférable de commencer par déstocker les boîtes "cibles" (qui recevront les tubes), et de terminer par celles qui seront vidées.*

*Démonstration.* Pour plus de clarté, nous utiliserons les notations suivantes. Les temps de déstockage et restockage d'une boîte seront notés  $t^d$  et  $t^r$ . Par extension, les heures de ces mêmes actions appliquées à une boîte  $X$  seront notés  $t_X^d$  et  $t_X^r$ . Une paire de dates  $(t, t')$  est dite paire de dates compatibles si déstocker un tube à la date  $t$  pour le re-stocker à la date  $t'$  ne viole pas la contrainte *StayFrozen*. Remarquons alors que si une boîte  $b_i$  reçoit des tubes d'une boîte  $b_j$ , alors  $(t_j^d, t_i^r)$  doit être une paire de dates compatibles.

Supposons une solution optimale dans laquelle deux boîtes,  $b_i$  et  $b_j$ , telles que  $b_i$  sera vidée et que  $b_j$  sera une boîte cible (qui recevra des tubes de boîtes à vider). Supposons également que  $b_i$  est déstockée juste avant  $b_j$  ( $t_i^d = t_j^d - t_{box}$ ). Nous allons montrer que  $b_j$  peut être déstockée avant  $b_i$  sans que la solution ne soit détériorée. Quatre cas doivent être considérés :

1. Si les tubes de  $b_i$  sont déplacés dans  $b_j$  alors échanger les dates de déstockage de  $b_i$  et  $b_j$  n'invalide pas la solution ( $t_j^r$  n'a pas à être modifiée).
2. Si les tubes de la boîte  $b_i$  sont déplacés dans une boîte  $b_k$ , censée être déstockée après  $b_j$ , alors intervertir  $b_i$  et  $b_k$  n'invalide pas la solution.

Si tous les tubes de  $b_i$  sont déplacés dans des boîtes déstockées avant  $b_i$ , alors deux cas sont possibles :

3. Si le temps entre le déstockage et le re-stockage de  $b_j$  est inférieur ou égal à  $T_{MAX} - t_{box}$  alors les heures de déstockage de  $b_i$  et  $b_j$  peuvent être inversées sans rendre la solution invalide.
4. Si le temps entre le déstockage et le re-stockage de  $b_j$  est égal à  $T_{MAX}$ , alors il existe une boîte  $b_k$  telle que  $t_k^d > t_j^d$ , qui sera restockée avant  $b_j$ . Alors échanger les dates de déstockage des boîtes  $b_i$  et  $b_j$  est possible, car  $t_j^r$  et  $t_k^r$  peuvent être interverties sans invalider la solution.

Par répétition des procédures décrites ci-dessus, nous pouvons conclure que déstocker d'abord les boîtes qui recevront les tubes des boîtes à vider n'interdit pas d'aboutir à une solution optimale.  $\square$

**Propriété 2.** *Il existe une solution optimale pour laquelle la manipulation des boîtes suit une règle de type FOFI (First Out First In).*

*Démonstration.* Considérons qu'une solution optimale existe pour laquelle les boîtes à vider sont déstockées à la fin de l'étape correspondante. Supposons que deux boîtes  $b_i$  et  $b_j$  telles que  $b_i$  est déstockée avant  $b_j$  ( $t_i^d < t_j^d$ ) et restockée après ( $t_j^r < t_i^r$ ). Les paires de dates  $(t_i^d, t_i^r)$  et  $(t_j^d, t_j^r)$  sont compatibles par définition de la solution.

$(t_i^d, t_j^r)$  forme une paire de dates compatibles car  $(t_i^d, t_i^r)$  l'est et que  $t_j^r < t_i^r$ .  $(t_j^d, t_i^r)$  est également une paire de dates compatibles car  $t_j^r < t_i^r$  et que  $(t_j^d, t_i^r)$  forme une paire de dates compatibles.

Aussi, pour chaque boîte  $b_k$  dont des tubes ont été ajoutés à  $b_i$  ou  $b_j$ , la propriété 1 fait que  $t_k^d > t_j^d$ , ce qui implique que  $(t_k^d, t_i^r)$  et  $(t_k^d, t_j^r)$  forment des paires de dates compatibles. Ainsi il est possible d'échanger l'ordre de remise au stock des boîtes  $b_i$  et  $b_j$ . La répétition de ce mécanisme implique la propriété 2.  $\square$

**Propriété 3.** *Afin de maximiser l'efficacité d'une occurrence de re-warehousing, il est préférable de manipuler les boîtes les moins remplies.*

*Démonstration.* Considérons une solution pour laquelle  $B_-$  est l'ensemble des boîtes qui seront vidées dans l'ensemble de boîtes  $B_+$ . Notons  $q_X$  le nombre initial de tubes dans une boîte  $b_X$ . Si il existe une boîte  $b_n$  n'appartenant ni à  $B_-$  ni à  $B_+$  mais dont le nombre de tubes  $q_n$  est tel que  $\exists b_k \in B_-, q_k < q_n$ , alors on peut remplacer la boîte  $q_n$  par  $q_k$  sans détériorer la solution. Le nombre de tubes à manipuler sera réduit de  $q_n - q_k$  et le nombre d'emplacements initialement disponibles dans  $B_+$  toujours suffisant car le nombre d'emplacements nécessaires aura été réduit. Si il existe une boîte  $b_n$  n'appartenant ni à  $B_-$  ni à  $B_+$  mais dont le nombre de tubes  $q_n$  est tel que  $\exists b_k \in B_+, q_k < q_n$ , alors on peut remplacer la boîte  $q_n$  par  $q_k$  sans détériorer la solution. Le nombre de tubes à manipuler sera identique et le nombre d'emplacements initialement disponibles dans  $B_+$  plus grand, donc toujours suffisant.

En répétant cette opération, on obtient une nouvelle solution aussi efficace que la solution initiale n'utilisant que les boîtes les moins remplies.  $\square$

**Propriété 4.** *Afin de maximiser l'efficacité d'une occurrence de re-warehousing telle que définie dans le paragraphe 3.4.2, il est préférable de sélectionner les boîtes les moins remplies, puis de déplacer les tubes des boîtes les moins remplies vers les boîtes les plus remplies des sélectionnées.*

*Démonstration.* Rappelons qu'il n'existe, dans le cadre du scénario de manipulations tel que défini dans la section 3.4.2, aucun intérêt à retirer des tubes d'une boîte pour en ajouter d'autres par la suite, et que l'on s'interdit de ne vider que partiellement des boîtes.

Considérons une solution optimale respectant la propriété 3 pour laquelle  $B_-$  est l'ensemble des boîtes qui seront vidées dans l'ensemble de boîtes  $B_+$ . Notons  $q_X$  le nombre initial de tubes

dans une boîte  $b_x$ . Supposons qu'il existe une boîte  $b_i \in B_-$  et une boîte  $b_j \in B_+$  telles que  $q_j < q_i$ . Une autre solution optimale peut être construite en retirant  $q_j$  tubes de la boîte  $b_j$  et  $q_i - q_j$  de la boîte  $b_i$ , au lieu de  $q_i$  tubes de la boîte  $b_i$ . La boîte  $b_j$  sera alors vidée et la boîte  $b_i$  pourra recevoir des tubes de  $B_-$ . Il est à noter que la solution devra être modifiée pour retirer les déplacements de tubes depuis la boîte  $b_i$ , ce qui peut être effectué simplement en retirant les étapes de transit intermédiaires dans la boîte  $b_i$ .

On obtient, en répétant cette opération, une solution toujours optimale pour laquelle l'ensemble des boîtes vidées correspond à l'ensemble des boîtes les moins remplies.  $\square$

Dans le cas où la contrainte *BoxPerType* est prise en compte, classer les ensembles par ordre décroissant du nombre de boîtes qu'ils comportent permet de commencer en regardant les ensembles contenant le plus de boîtes. On débutera ainsi l'observation des autres ensembles de boîtes avec une borne supérieure potentiellement élevée, ce qui pourra permettre de réduire le temps de parcours des types de boîtes lors de la recherche de la meilleure réaffectation à effectuer. L'implémentation de l'algorithme est telle que dans le cas où deux solutions sont équivalentes, un choix arbitraire devra être effectué. L'utilisation de l'historique des déstockages pourra permettre d'orienter le choix, mais l'implémentation actuelle veut que ce soit la dernière qui sera retenue.

L'application de cette dernière propriété sous forme d'algorithme permet d'optimiser l'efficacité d'une instance de re-warehousing. Il est toutefois important de noter que si son application stricte permet des occurrences optimales des premiers re-warehousings, elle n'est pas optimale sur le long terme (on l'appellera algorithme "myope"). La section suivante décrit des pistes et détails d'implémentation d'algorithmes prenant en compte le long terme.

### 3.4.4 Vers une politique de prise en compte du long terme

Les algorithmes définis ci-dessus permettent d'optimiser la performance d'une seule réaffectation, mais ne prennent pas en compte l'état du stock après cette occurrence. Considérant que les réaffectations ont lieu avec une fréquence non négligeable par rapport aux déstockages, il est nécessaire d'appliquer une politique qui ne réduit pas les possibilités de réaffectations trop rapidement.

#### 3.4.4.1 Boxes shifting

Lorsqu'une solution a été trouvée en utilisant les propriétés énoncées ci-dessus, on peut espérer l'améliorer en optimisant les boîtes concernées pour laisser la possibilité d'effectuer des réorganisations à plus long terme. Dans ce cas, il est intéressant d'utiliser, si possible, des boîtes dont le taux de remplissage est supérieur à celui de la solution initiale, afin de maximiser le potentiel des prochaines occurrences de l'activité de réaffectation. L'importance de remplacer des boîtes sélectionnées pour d'autres plus remplies est relative au contexte dans lequel on lance le processus de réaffectation, et de l'objectif associé.

Le cas où l'on cherche à dispatcher rapidement le contenu d'une boîte afin de libérer un emplacement de rack, ce que nous avons appelé "déclencheur d'urgence", semble peu compatible avec le fait d'allonger consciemment la durée du processus. Une alternative relativement peu

contraignante a été imaginée et implémentée. Elle consiste à autoriser tout décalage des boîtes (l'origine ou les cibles) à condition que ce décalage n'implique pas la nécessité de manipuler des boîtes additionnelles. Cette règle a pour intérêt de ne pas trop allonger le temps de réaffectation dans le cas où on décale la boîte origine, et de maximiser le taux de remplissage final des boîtes cible. L'algorithme mis en place commençant par décaler les boîtes cibles, le nombre de décalages de la boîte origine ne sera important que dans certains cas particuliers car les décalages préalables auraient dû rapprocher le nombre d'emplacements libres des boîtes cibles du nombre de tubes à réaffecter.

Dans le cas où l'opération a comme objectif de vider un maximum de boîtes, l'algorithme se déroule comme suit :

```
1: nbOrigBoxesMax ← Le nombre de boîtes que l'on peut vider
2: while nbOrigBoxesMax boîtes ne sont pas marquées do
3:   if on peut remplacer la plus vide des boîtes à vider par une boîte plus remplie then
4:     le faire
5:   else
6:     marquer la boîte
7:   end if
8: end while
9: while toutes les boîtes cibles ne sont pas marquées do
10:  if on peut remplacer la cible la moins remplie pour une ou plusieurs plus pleines then
11:    le faire
12:  else
13:    marquer la boîte
14:  end if
15: end while
```

**Algorithm 1:** Algo de Re-Wa

#### 3.4.4.2 Utilisation de la "Moyenne Cible"

La "Moyenne Cible" a été définie pour améliorer l'algorithme de décalage de boîtes, créant une solution initiale améliorée. Pour un nombre donné de boîtes cibles, connaissant le nombre de cryotubes à réaffecter, on calcule la moyenne du nombre d'emplacements libres nécessaire dans chaque boîte cible. Les boîtes cibles sont ensuite choisies parmi celles se situant autour de ce taux de remplissage. L'évolution du contenu des boîtes entre deux re-warehousings est difficilement prévisible ; on ne peut par conséquent pas décider de conserver des boîtes ayant un contenu particulier.

#### 3.4.4.3 Définition d'une "Limite Critique"

La limite critique correspond au taux de remplissage au dessus duquel on sait qu'il sera impossible, vu le scénario des manipulations, de vider une boîte en une seule occurrence de re-warehousing (considérant que l'on ne vide des boîtes que dans d'autres boîtes au moins aussi pleines).

Le calcul de cette borne a comme composantes le nombre d'échantillons par boîte ( $nbCt$ ), les temps de manipulation des boîtes et tubes ( $T_{Box}$  et  $T_{Tube}$ ), ainsi que le temps d'inventariage d'une boîte ( $T_{Inv}$ ). Elle dépend donc à la fois du scénario matériel, de la qualification du personnel et des paramètres de la contrainte *StayFrozen*.

Essayons de définir le temps nécessaire pour vider une boîte contenant  $X$  tubes. Posons  $Y = nbCt - X$ .

D'après la propriété 4, de laquelle découle le fait que les boîtes cibles sont au moins autant remplies que les boîtes origines (boîtes que l'on va vider); il faut utiliser au moins  $\lceil \frac{X}{Y} \rceil$  boîtes pour vider une boîte contenant  $X$  tubes. Il faudra donc sortir au moins  $M = 1 + \lceil \frac{X}{Y} \rceil$  boîtes des tanks. Ainsi, le temps nécessaire avant de remettre la première boîte dans le stock est de  $M.T_{Box} + (M - 1).T_{Inv} + X.T_{Tube}$ . Ce temps doit être inférieur à la limite imposée par la contrainte *StayFrozen*; on a donc  $M.T_{Box} + (M - 1).T_{Inv} + X.T_{Tube} \leq T_{MAX}$ , soit  $(T_{Box} + T_{Inv}).\lceil \frac{X}{Y} \rceil + X.T_{Tube} \leq T_{MAX} - T_{Box}$ .

A partir de cette inégalité, nous avons implémenté une fonction itérative de recherche de la limite critique. Elle consiste en une recherche dichotomique de la limite critique, appliquée d'abord aux valeurs palier de  $\lceil \frac{X}{Y} \rceil$ , puis basée sur la vérification de la contrainte *StayFrozen* en incrémentant la valeur de  $X$ . La limite critique est la dernière valeur pour laquelle la contrainte est respectée.

Cette inégalité permet d'aider à décider de certains paramètres. L'acquisition de régulateurs de chaleur dans la zone de manipulation des boîtes peut par exemple impacter  $T_{MAX}$ , et les différents modes d'inventariages  $T_{Inv}$ ,  $T_{Box}$  et  $T_{Tube}$ . La figure 3.7 illustre la relation entre  $T_{MAX}$  et le contenu maximal d'une boîte pouvant être vidée. Une amélioration pertinente consisterait en l'interconnexion entre ce graphique et le rapport entre  $T_{MAX}$  et la température ambiante dans la zone de manipulations. Dans l'éventualité d'une généralisation de l'activité de re-warehousing, ce simple outil pourrait devenir un outil d'aide à la décision à faible coût, permettant d'estimer la pertinence d'acquérir un dispositif ou de décider d'un mode opératoire réduisant les durées des différentes manipulations, impactant  $nbCt$  ou augmentant  $T_{MAX}$ .

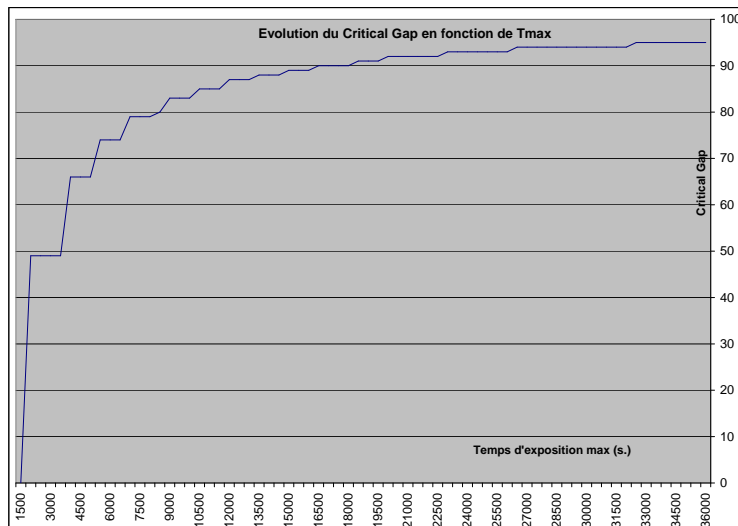


FIGURE 3.7 – Évolution de la valeur limite "Critical Gap" en fonction de  $T_{MAX}$

Deux usages de cette valeur sont pressenties une fois les paramètres connus : afin de rapidement savoir qu'il n'existera pas de re-warehousing réalisable mais également en amont du décalage de boîtes cibles (boxes shifting). Dans le cas où un déclencheur périodique est mis en place, une politique à long terme peut être de choisir les boîtes cibles préférablement parmi les boîtes contenant plus de tubes que la Limite Critique.

## 3.5 Modélisation et Simulation

Cette section décrit plus précisément la manière dont ont été implémentés le modèle et les fonctions de réaffectation. Nous avons utilisé le logiciel distribué par Rockwell™ : Arena, version 11. Ce logiciel est décrit par [Law and Kelton \[2000b\]](#) comme généraliste, permettant de créer des modules et fiches d'indicateurs de performance. Sa capacité d'interfaçage avec des programmes externes est également un atout, souligné notamment par [Seppanen \[2000\]](#) et [Torres and Glynn \[1995\]](#). Nous fournirons dans cette section quelques captures d'écran pour illustrer certains détails d'implémentation de la simulation.

Nous avons fait le choix d'utiliser des routines Visual Basic for Applications (VBA) autant que possible, que ce soit lors d'évènements au cours du déroulement d'une réplification ou des évènements ayant lieu entre les réplifications d'un scénario ou entre les scénarios. La dénomination de "blocs VBA" signifie que les évènements déclenchés lorsqu'une entité atteint cette étape de la simulation ont été implémentées directement en VBA. Le choix d'implémenter manuellement des routines a été motivé par plusieurs points :

- La volonté de pouvoir facilement extraire les parties décisionnelles du modèle afin d'éventuellement les réutiliser dans un contexte réel ;
- La possibilité pour le modèle de devenir un outil ouvert et libre nécessite d'autant moins de travail d'adaptation que peu de modules Arena sont utilisés ;
- La lecture des stocks étant gourmande en ressources, et donc en temps d'exécution, nous avons souhaité inverser la priorité entre les réplifications et les scénarios. Autrement dit, chaque réplification s'effectue pour tous les scénarios, ce qui nécessite une procédure particulière redéfinissant notamment les évènements de début de réplification et de simulation, mais qui permet de ne lire ou générer une instance de stock initial qu'une fois pour l'ensemble des scénarios.

### 3.5.1 Implémentation

Les arrivées d'échantillons suivent une loi exponentielle, pour laquelle les paramètres sont calculés suivant les données lues dans le fichier de variables, à la feuille concernant les quantités d'activités retranscrite figure 3.8. Ces données permettent d'établir une moyenne sur les arrivées. De cette moyenne sont déduites les deux probabilités d'apparition, l'une étant la loi d'arrivée pendant la période de grande affluence (rush) et l'autre définit la loi d'arrivée en dehors de cette période quotidienne. Cette variation de la quantité d'activité a été implémentée au travers d'un ensemble de blocs Arena "Create" et "VBA", qui apparaissent figure 3.9.

La valeur de la loi d'arrivée est modifiée directement lors du début de cette période, mais le retour à la valeur "normale" n'est effectué qu'au moment où le prochain prélèvement a lieu.

11 Sang	Moelle	CLARN	2 CL	CLADN	Plasma	Serum	ARN	N CL	CellViabiles	ADN	
5557	0	0	0	0	0	0	1547	0	2127	267	1616
574	0	0	0	0	0	0	0	421	0	153	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
260	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	260

FIGURE 3.8 – Tableau des quantités d'activité

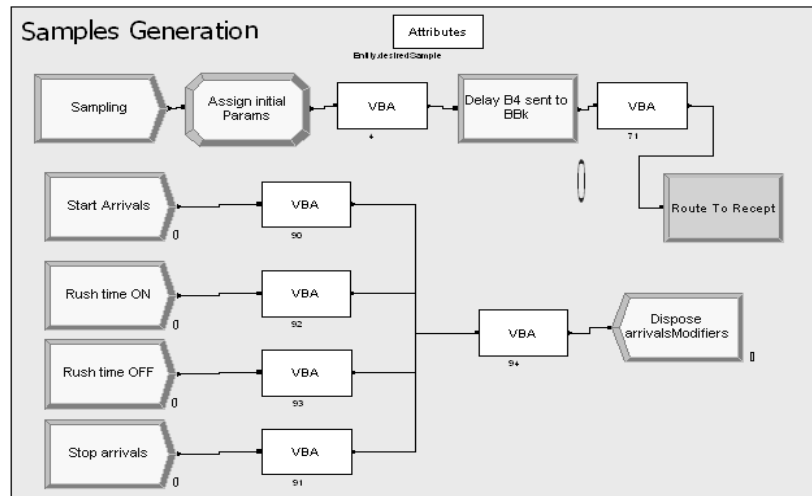


FIGURE 3.9 – Arrivée des échantillons, capture d'écran du logiciel Arena

Les entités entrantes sont ensuite paramétrées, toujours suivant les données lues au début de la réplcation. Le type de l'entité entrante, ainsi que les transformations souhaitées et leur nombre d'aliquots, issu d'une variable aléatoire, sont associées à l'entité suivant la probabilité concernant la demande d'un protocole de transformation ou un autre. Un identifiant unique est également associé à l'entité, et l'heure d'arrivée est enregistrée. Une variable aléatoire uniforme  $U_{(0,8)} + 4$  définit le temps de transfert de l'entité vers la zone de réception de la biobanque.

Le découpage des prélèvements est effectué au travers des modules illustrés dans la figure 3.12. Le code VBA associé permet de définir les paramètres concernant les futures transformations et les déplacements. Le module de décision et le bloc VBA dans cette boucle sont configurés suivant les données précédemment stockées dans les attributs des entités "Prélèvement" entrantes. Le bloc VBA configure les aliquots pour les placer dans une file d'attente d'où ils sortiront lorsque la phase de découpage sera terminée. La destination des échantillons est générée suivant leur état actuel et le type d'échantillon désiré. Les attributs permettent aux entités d'être envoyées dans les stations telles que montrées dans la figure 3.10. Certains pourront ainsi

être sujets à plusieurs transformations consécutives.

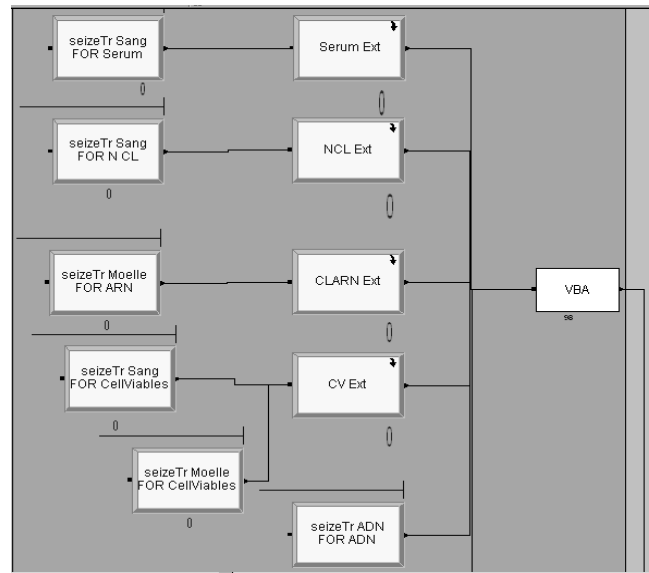


FIGURE 3.10 – Sous-processus des transformations

L'informatisation des données a lieu dans la même station virtuelle. Les paramètres des scénarios impactent ceux des entités qui configurent à leur tour les modules d'allocation et de libération des ressources humaines, comme "Release Transporter" dans la figure 3.11, nécessaires au transfert des fiches d'informations. Suivant le type d'entité et le scénario, une ressource humaine est nécessaire ou non à l'informatisation des données et au transport des fiches d'information. Le module "Hold informatise" bloque le passage jusqu'à ce qu'un signal particulier soit reçu, ce signal étant envoyé suite à une création d'entités dédiée et représentant la fréquence de mise à jour de la base de données.

Plusieurs arrivées dédiées existent dans le modèle : les arrivées concernant le lancement de l'automate d'extraction d'ADN, planifiées le soir si le nombre d'échantillons n'a pas atteint le niveau désiré à cette date, ou encore le lancement planifié d'un re-warehousing.

Les déplacements physiques dans la biobanque sont gérés par des routes entre des stations, qui correspondent aux salles à l'exception de la salle de cryo-conservation qui contient deux stations. L'attribut "Entity.currentArea" des entités est mis à jour à l'arrivée dans chaque station, et "Entity.nextArea" avant son départ. Ces deux valeurs permettent de paramétrer les durées de transferts en se rapportant à la matrice des distances. Pour les transformations, nous avons mis en place le formalisme de nomination des stations suivant : "<"currentType" FOR "toProduce">". Ces noms permettent de créer plus facilement des protocoles incluant plusieurs transformations en marquant dès le découpage des échantillons le type que chacun devra avoir à la fin des transformations. Le nom des stations de destination des tubes est alors "<"currentType" FOR "toProduce">". Ce format permet d'avoir d'un côté un modèle incluant les protocoles, dont les propriétés sont communes à la majorité des biobanques et qui peuvent regrouper certaines transformations communes à plusieurs protocoles. D'un autre côté un fichier de paramétrage de l'activité de la biobanque étudiée, qui configure les proportions d'occurrence de ces para-



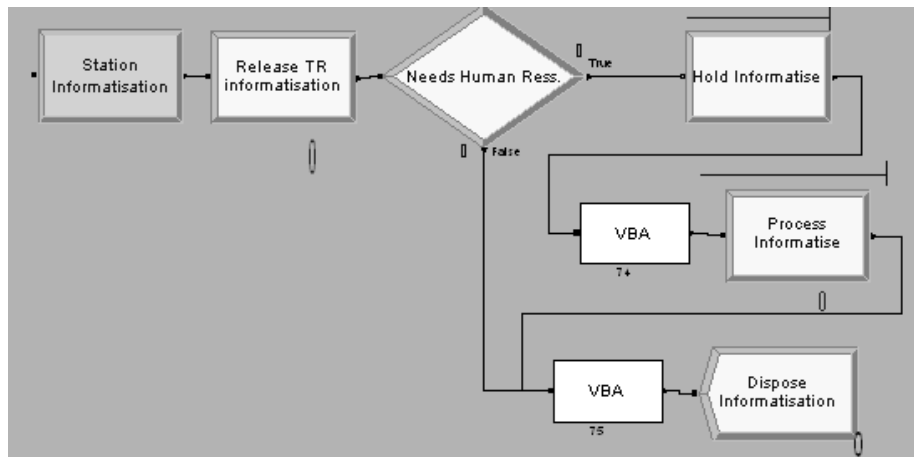


FIGURE 3.11 – Computerization overview

mètres. Les parties communes de certaines transformations, la solubilisation par DMSO par exemple, passent ainsi par la même étape, avant que leurs chemins ne se séparent en vue de la transformation suivante.

Nous avons décrit les processus composant les différentes étapes du traitement d'un spécimen dans une biobanque en 3 sous-processus, afin de pouvoir plus facilement implémenter des scénarios incluant l'utilisation d'objets communicants.

Au début de chaque scénario, le fichier de variables (*variablesArena.xls*) est ouvert et les paramètres de quantité d'activité (Figure 3.8), de distances (Tableau 3.1) et concernant les paramètres du scénario (Tableau 3.2) sont lus.

La figure 3.13 image le modèle décrit ci-dessus. On observe que les contraintes de précedence ne sont pas présentes dans la description 'tableur' et sont de fait inhérentes au modèle. Un effort de programmation supplémentaire est nécessaire afin de résoudre ce détail.

Les employés sont modélisés comme de "simples" ressources, qui peuvent être dans l'un des trois états *Disponible*, *Occupé* ou *Indisponible*. Les générations d'erreurs, comme d'autres affectations de valeurs plus ou moins aléatoires (durée des processus, mises à jour de la base de données, nombre d'aliqots possible par échantillon, etc.), sont effectuées au travers de blocs VBA. Ces blocs ont également été utilisés pour ajouter un facteur de dégradation de la performance (PSF pour *Performance Shaping Factor*, comme défini dans [Garnerin et al. 2007]) qui, bien qu'assez basique, permet de montrer la possibilité de modéliser ce type de détail sans pour autant compliquer la modélisation des ressources humaines. Ce PSF représente une forme de stress. Nous considérons à travers lui qu'une grande quantité de tâches en attente implique une augmentation de la probabilité d'erreurs d'une valeur arbitraire de 5%.

Un fichier contenant un stock initial est également lu au début de chaque réplcation du premier scénario. Le stock initial est ensuite copié, puis réutilisé pour la même réplcation de chacun des autres scénarios. La gestion du stock est intégrée au modèle, au travers de l'en-

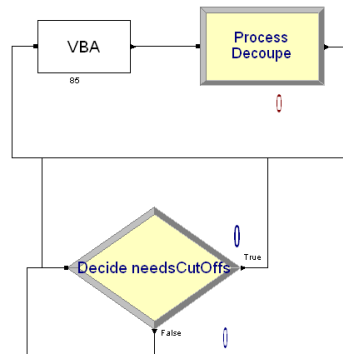


FIGURE 3.12 – Sous processus de découpage du prélèvement sélectionné en plusieurs aliquots

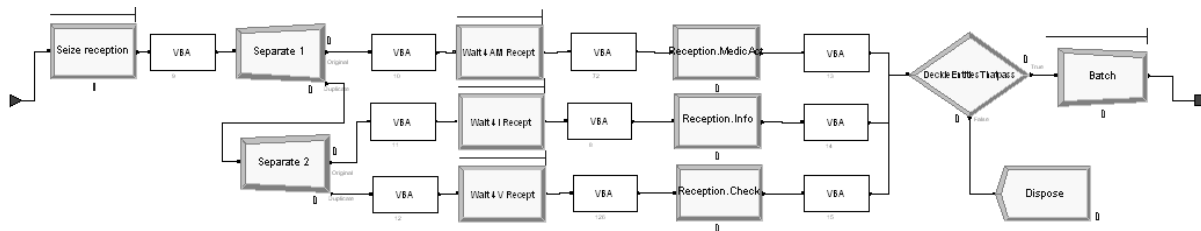


FIGURE 3.13 – Décomposition des processus en trois parties (Acte médical, information et vérification).

semble des classes présentes dans la figure 3.14. Dans un premier temps le stock était modélisé deux fois, dans des bases de données Access fort ressemblantes à la proposition de [Eder et al. 2009] gérées par des fonctions ActiveX (comme recommandé par [G.F.Kalsdorf 2006]). L'une représentant le stock réel et l'autre l'état du stock virtuel (dans le système d'informations). Si cette approche permet une modélisation très précise de ce que contient le stock et la base de données associée, celle-ci est de fait inadéquate par rapport à la précision du reste du modèle, notamment vue la granularité des ressources humaines. Un autre inconvénient est le temps d'exécution du modèle, grandement augmenté par les multiples appels aux deux bases de données, et à leur parcours lors des recherches d'erreurs et vérifications de conformité. Enfin, comme un tel choix aurait nécessité une modélisation très précise des règles de fonctionnement régissant les biobanques étudiées, la réutilisation du modèle aurait été rendue plus difficile et sa généricité réduite.

Le stock a donc finalement été simplifié pour un fichier tableur dans lequel les lignes représentent successivement les numéros de congélation de chaque échantillon puis le nombre d'aliquots correspondants, ce qui est d'autant plus intéressant quand le nombre d'aliquots moyen dans le stock initial est élevé. Deux colonnes de ces fichiers indiquent la quantité totale d'échantillons présents dans la boîte et son type pour les cas où la contrainte *BoxPerType* est active.

Afin de limiter les appels à ActiveX/Excel pour gérer le stock, dans un objectif de rapidité d'exécution des simulations, les informations de ce fichier vont paramétrer les classes *StockMan*

et ses nombreuses instances de *BoxOfCryotubes* au début de chaque réplication. L'allocation de l'espace mémoire pour la gestion du stock dépend de la taille de celui-ci. On utilisera donc volontiers l'option "preserve" de la fonction "redim" en cours de simulation afin d'augmenter par paliers la taille du stock définitif. On peut ainsi améliorer la robustesse du modèle sans sur-dimensionner l'allocation mémoire du stock.

Les stocks initiaux pouvant avoir une taille considérable par rapport aux données concernant les scénarios de fonctionnement (nos partenaires conservent plusieurs centaines de milliers d'échantillons), les réplifications de chaque scénario sont exécutées d'affilée. Cela permet de ne lire qu'une seule fois les fichiers initiaux de stock, et en travaillant sur des copies de celui-ci.

La gestion du stock s'effectue principalement au travers de routines écrites en VBA, recommandées pour -entre autres- les utilisateurs d'Arena [Seppanen 2000]. La figure 3.14 est un diagramme des classes implémentées pour effectuer les fonctions de déroulement de la simulation et de gestion du stock. Conformément aux propriétés décrites dans la section 3.4.3, la construction du re-warehousing induit par le déclencheur *emTrigger* mène à une réaffectation pour laquelle le "box shifting" n'est pas appliqué à la boîte à vider, et n'autorise pas non plus l'ajout de boîtes cibles. Les déclencheurs planifiés impliquent par contre des re-warehousing fort orientés sur le long terme, essayant de vider des boîtes aussi remplies que possible dans un nombre maximal de boîtes.

Le stock virtuel est mis à jour avant que les réaffectations n'aient eu lieu, ce qui paraît logique car les boîtes sont retirées des cuves dès le début de la manipulation. Une variable indique si un processus de re-warehousing est en cours ou pas. Nous supposons qu'il est impossible d'effectuer deux réaffectations en même temps. L'information concernant l'étape à laquelle en est le processus n'est pas précisée, et n'a dans notre cas d'étude que peu d'importance pour plusieurs raisons :

- L'occurrence d'un re-warehousing permet de libérer au moins un emplacement de boîte à cryotubes. La probabilité pour que deux boîtes aient à être stockées en moins de  $T_{MAX}$  est assez faible, et il est possible de facilement délayer le stockage d'une boîte en utilisant temporairement un emplacement de réserve. Un processus de durée  $t_{box}$  précède et suit l'attente de la fin du re-warehousing en cours.
- L'impact de l'intervention d'un manipulateur préparant une commande est dépendant de la granularité du logiciel de gestion de stock utilisé. S'il y a un détrompeur pour les réaffectations vérifiant qu'aucun tube n'est manquant au moment des inventaires finaux, le préparateur de la commande induira par son action le déclenchement de l'alarme. Toutefois, si le logiciel gère également les déstockages, il peut "savoir" que ledit tube est actuellement dans le sachet de préparation, et donc faire avorter l'alarme concernant ce tube. Nous avons estimé que les préparations de commande n'ont pas à avoir lieu en même temps qu'un re-warehousing, ne serait-ce que par manque de ressources, notamment matérielles.
- Un intérêt de différencier le cas dans lequel des tubes à déstocker sont dans des boîtes en cours de réorganisation est que l'on peut penser que le temps de traitement sera différent. Mais ce n'est que partiellement le cas, parce qu'il est possible que le préparateur de la commande en cours commence par aller voir dans la cuve à échantillons, afin de ne pas déranger le procédé très contraint de re-warehousing. Il viendra jute après chercher le tube dont il a besoin parmi les boîtes en cours de réorganisation. Nous avons donc considéré

qu'il n'y aurait pas d'impact sur le temps de manipulation.

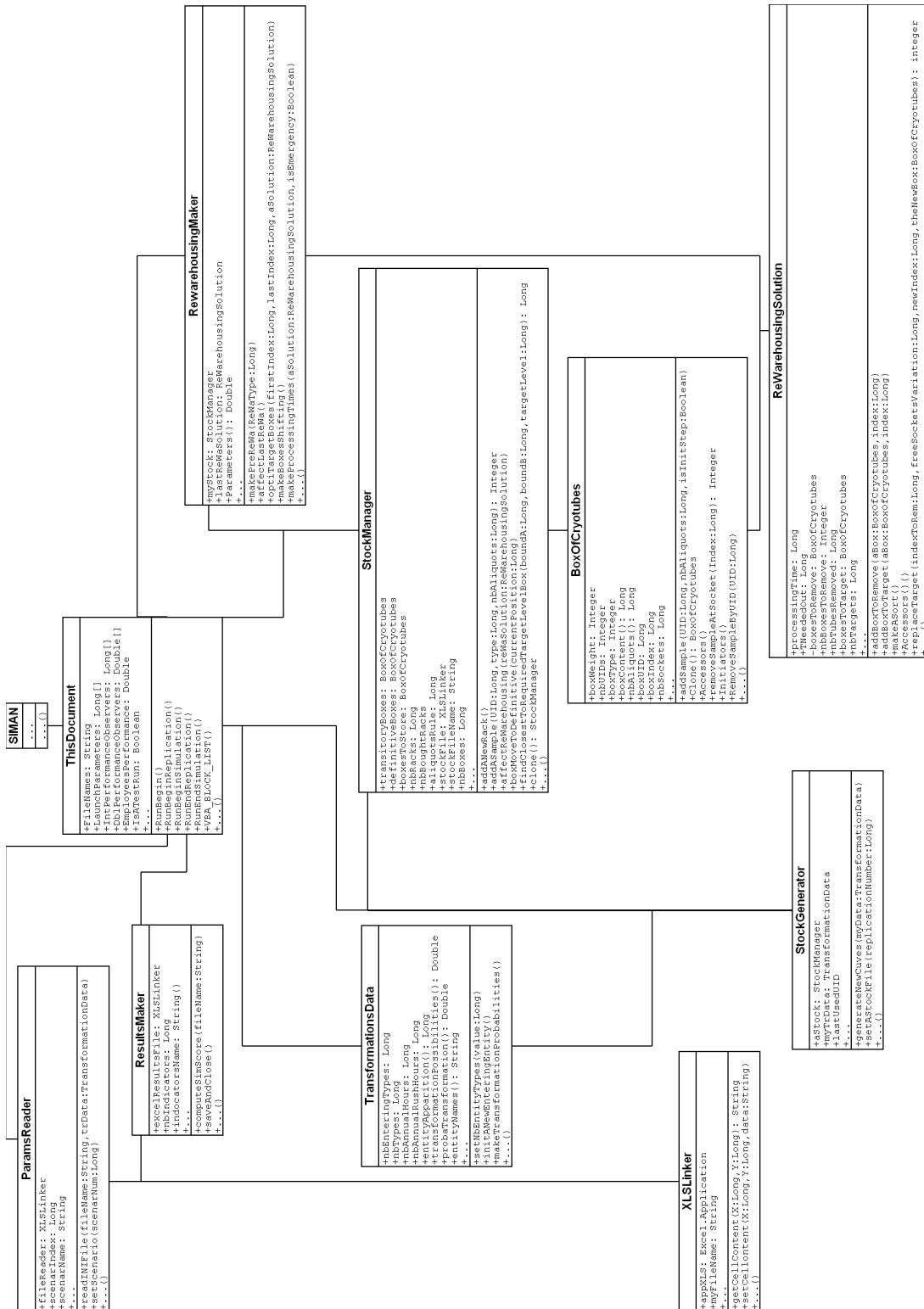


FIGURE 3.14 – Diagramme des classes VBA du modèle.

### 3.5.2 Indicateurs de performance retenus

L'estimation des apports relatifs à la mise en place d'une solution technologique sont très difficiles à estimer, notamment dans le monde hospitalier où la notion de performance est un problème à part entière. De plus, nous avons observé que certains dispositifs pouvaient d'une part permettre l'apport de nouveaux processus, et d'autre part mener à la modification de la quantité d'une activité. Par exemple, le fait d'assurer la traçabilité et la qualité des échantillons d'une biobanque peut accroître le nombre de demandes de cessions de la part d'établissements extérieurs, alors que les dispositifs d'inventoriage rapide permettent l'optimisation du stock au travers de la réorganisation des boîtes de cryotubes. Nous avons décrit les biobanques comme un système socio-technique de production (transformation d'un prélèvement en un ensemble d'échantillons utilisables) et de gestion d'un stock pour lequel le respect de la chaîne du froid est un caractère primordial. La mesure de la performance retenue sera donc multidimensionnelle. D'une part parce que les indicateurs de performance des différents décideurs hospitaliers peuvent être conflictuels [Minvielle et al. 2007], et d'autre part parce qu'il est impossible, de notre point de vue, de rapporter les risques d'erreurs et leurs conséquences à des indicateurs pécuniaires. Il est donc difficile d'agréger les types de paramètres qui seront les plus impactés par l'introduction de technologies sans contact.

En accord avec les dimensions de la mesure de la qualité décrites dans la section 2.1, nous avons intégré à cette étude les indicateurs listés ci-après afin de comparer la performance des scénarios observés. Certains peuvent se voir rapportés à plusieurs dimensions de la mesure de performance. D'autres, comme la quantification du nombre de racks utilisés, sont directement reliés au système observé et aux apports relatifs aux technologies de radio-identification :

**Nombre d'erreurs** différenciant le nombre d'erreurs à l'inventoriage des boîtes, certes problématique, et le nombre d'erreurs de saisie et copie, qui peuvent avoir des conséquences plus graves. Évidemment très lié au risque, cet indicateur peut être impacté par l'état d'esprit du personnel, la qualité de la communication, le surmenage, et tous les facteurs de dégradation de la performance (Performance Shaping Factors \_ PSFs) augmentant potentiellement le nombre d'incidents, le nombre de non-observations d'incidents, et donc le nombre d'erreurs.

**Temps de processing** pour différentes étapes. Le temps entre la réception d'un prélèvement et l'informatisation des données le concernant, appelée (*IS Fulfillment delay*). La réduction de ce temps pouvant impacter le temps d'obtention des résultats d'éventuelles analyses, tout en améliorant le suivi des échantillons, ce qui est important pour la satisfaction des patients, mais également leur sécurité. La durée des transformations, (*Transformation time*), est le temps entre la réception d'un prélèvement et l'informatisation des échantillons en étant issus. Le temps entre la réception d'un prélèvement et le stockage de ses premiers aliquots est appelé (*Throughput time*).

**Utilisation des ressources humaines** est calculé relativement au scénario actuel. Cet indicateur est rapportable évidemment à la dimension financière, mais également à la notion d'acceptation du changement. En effet, le personnel hospitalier en général et le personnel des biobanques en particulier, sont des personnes hautement formées, qui devraient se trouver heureuses de ne plus avoir à effectuer les tâches les plus rébarbatives qui ne

nécessitent aucune compétence particulière, comme ce fut le cas dans [Swedberg 2009b].

**Réaffectation d'emplacements de cryotubes** est principalement lié au caractère financier du résultat. En effet, sans même prendre en compte les coûts de maintenance des cuves d'azote liquide (ou gazeux), le coût de l'équipement est loin d'être négligeable. Rajoutons à cela qu'il est nécessaire (réglementaire) d'avoir à disposition une certaine quantité de stocks libres en cas de pannes, qu'il faut des employés d'astreinte en cas de défaillances, et que l'achat de cuves peut impliquer des besoins immobiliers. Il révèle indirectement la bonne utilisation du stock.

Cette étude ne contient pas d'estimation du retour sur investissement (ROI) pour plusieurs raisons : les établissements n'ont pas forcément les mêmes contraintes relatives à l'augmentation de leur espace de stockage. Certains des dispositifs que nous testons au travers de la simulation des prototypes, ou ils font partie de solutions propriétaires obligeant l'adoption d'une solution complète ; leur coût est donc difficile à estimer. Les coûts de main d'œuvre peuvent énormément varier suivant la localité dans laquelle on se place. Plus généralement, le coût des nouvelles technologies décroît rapidement avec la généralisation de leur adoption ; les prix des solutions RFID (cryotubes taggés, lecteurs X/Y) et des systèmes informatiques associés ne sont pas stabilisés.

Les indicateurs présentés ci-dessus contiennent une partie des facteurs important du ROI. Les données à prendre principalement en compte peuvent être séparées en deux parties : les coûts d'intégration (formation du personnel, équipement en lecteurs et antennes, mises à jour du SI, augmentation de la capacité des bases de données, études...) et la variation des coûts opérationnels (utilisation des ressources humaines, maintien du stock, coût d'un cryotube intelligent par rapport à un classique, maintenance du matériel et des SI, variation de l'utilisation en ressources humaines, maintenance des tanks, incluant la probabilité du besoin d'accroissement de l'espace de stockage.

### 3.5.3 Paramètres

Cette section décrit premièrement les paramètres généraux des simulations observées, qui n'ont pas vocation à être modifiés d'un scénario à l'autre car ils ne sont pas directement impactés par l'utilisation de différentes technologies. Sont ensuite décrites les valeurs utilisées concernant la génération d'erreurs de copie, dont un facteur utilisé pour comparer l'efficacité d'un même système dans différentes conditions. Seront ensuite décrits les scénarios observés ainsi que leurs principaux paramètres.

Le temps entre l'arrivée de nouveaux échantillons suit une loi exponentielle. Nous avons considéré une semaine comme une suite de 5 jours, et chaque jour apparaît un intervalle de temps pendant lequel les arrivées seront plus fréquentes que le reste de la journée. Le paramètre de la loi d'arrivée est donc modifié au cours de la journée (Figure 3.9). Les deux valeurs du paramètre de la loi d'arrivée sont calculées à partir du nombre de prélèvements entrants annuellement. Le ratio entre les deux paramètres est de 1.618 ; cette valeur arbitraire parût crédible aux yeux de nos collaborateurs du milieu de la santé.

Soient  $nbA$  le nombre d'arrivées annuelles,  $H_O$  le nombre total d'heures d'ouverture et  $H_R$  le nombre d'heures en période de grande affluence. Le paramètre de la loi exponentielle d'ar-

Tableau 3.1 – Temps des déplacements entre les zones (en secondes).

De / À	Réception	Transformations	Stockage	Extraction de l'ADN/ARN
1- Réception	0	21	19	123
2- Transformations	21	0	33	103
3- Stockage	19	33	0	144
4- Extraction de l'ADN/ARN	260	260	260	0

rivée des prélèvements passe alors de  $\frac{H_O - H_R + 1.618 \times H_R}{nbA}$  à  $\frac{H_O - H_R + 1.618 \times H_R}{1.618 \times nbA}$  pendant les "heures de pointe". La transition entre ces modes d'arrivées se fait au travers d'un ensemble de blocs "Create", à arrivée constante.

Les requêtes de cession suivent une distribution exponentielle paramétrée à 1 jour. Lors des arrivées de requêtes, le nombre de tubes à céder suit une valeur aléatoire uniforme, limitée à l'intervalle [3, 8] et moyennée à 5.5. Chacun des tubes est alors déterminé par un ensemble {boîte, emplacement}.

Les boîtes de cryotubes contiennent 100 emplacements (sockets). Les boîtes sont stockées dans des racks, qui ont une capacité de 12 boîtes. Le temps nécessaire pour démarrer l'utilisation d'un nouveau rack,  $T_{shortage}$ , est fixé à une demi heure. Considérant la mise en place de l'activité de re-warehousing, le stock initial utilisé a une grande importance. Nous avons utilisé trois types de stock initiaux, générés comme suit.

Le premier, "EmptyStock", ne contient que deux racks remplis de boîtes pleines. Il correspond au cas où une nouvelle biobanque utilise la technologie. Il est fort probable que la première des boîtes à stocker nécessitera l'utilisation d'un nouveau rack. Pour les deux autres cas, des boîtes sont générées jusqu'à ce que le stock contienne 100 000 tubes. Le nombre de tubes dans chaque boîte est décidé via une loi uniforme. Dans le premier cas, qui mène à une proportion de remplissage moyenne de 77,5%, chaque boîte possède une probabilité de 10% de contenir entre 11 et 60 tubes, 60% de contenir de 61 à 90 tubes et 30% de contenir entre 91 et 100 tubes. Le troisième stock initial a une proportion de remplissage moyenne de 81% ; les probabilités sont les mêmes que précédemment mais le remplissage des boîtes est différent : de 11 à 70 tubes pour le premier ensemble, de 71 à 90 tubes pour le second et 91 à 100 tubes pour le troisième. Ces niveaux de stock ont été déterminés pour observer les cas où il devient possible de n'acheter aucun rack au cours de l'exercice, les bornes utilisées sont des estimations visant à générer des niveaux de stocks réalistes.

Les temps de réalisation des processus de transformations ont été implémentés en utilisant les données de l'Institut Paoli Calmettes. Le tableau 3.1 contient les délais des déplacements entre les différentes zones. Cette matrice n'est pas symétrique à cause de la nécessité d'effectuer des processus spécifiques à l'entrée de la "zone propre".

Lorsqu'ils sont planifiés, les re-warehousings ont lieu les vendredis après-midi. Les durées des manipulations effectuées durant cette activité sont (en secondes) :  $T_{MAX} = 1800$ ,  $t_{box} = 150$ ,  $t_{tub}$  dépend du scénario, et apparaît dans le tableau 3.2,  $t_{tub} = 3$  si on utilise l'antenne X/Y et  $t_{tub} = 5$  si on utilise l'antenne stylo.



### 3.5.3.1 Probabilités d'erreurs

Les probabilités d'erreur utilisées sont générées comme décrit ci-dessous. Il est important de noter que ces probabilités ne sont pas forcément révélatrices de ce qui se passe dans les établissements partenaires ; des observations sur place ont été pratiquées mais les résultats obtenus n'étant pas significatifs, nous avons utilisé des données issues de la littérature afin de paramétrer le modèle.

La probabilité qu'une erreur ait lieu au cours de l'informatisation manuelle d'une fiche de données a été fixée à 1.1%. Cette valeur provient de [Marcellis-Warin 2003], qui rapporte que 10% des opérations hospitalières sont sujettes à des erreurs, et que 11% de ces erreurs sont dues à des retranscriptions ; le produit de ces deux valeurs pour obtenir la valeur de 1.1% utilisée. Cette opération est certes contestable, car plusieurs transcriptions peuvent avoir lieu lors d'une opération hospitalière. La difficulté d'acquérir ce type de données est bien connue des professionnels de la simulation autant que des professionnels de la santé, mais cette valeur, qui peut être qualifiée d'arbitraire, sera relativisée au travers du niveau de performance des employés, défini ci-après.

La probabilité initiale qu'une erreur survienne lors de l'inventoriage manuel d'une boîte de cryotubes est fixée à 3%. Cette valeur a été décidée après avoir discuté des résultats de [Garnerin et al. 2007] avec nos partenaires hospitaliers.

Les probabilités d'erreur sont réduites à 0.01% lorsque l'on utilise des tubes auto-communicants pour l'informatisation ou une antenne X/Y pour l'inventoriage ; et 0.1% lors de l'inventoriage d'une boîte à l'aide d'une antenne stylo. Ces valeurs sont complètement arbitraires, nos partenaires industriels nous ayant proposé d'utiliser la valeur zéro. Cette proposition a été rejetée vu la faible maturité du système qui sera mis en place, le manque d'études de rétention de l'information à long terme et le risque que certaines informations aient à être copiées manuellement suite à une perte du réseau par exemple. L'agrégation de ce type d'incidents est fort discutable, mais nous rappelons que toutes ces valeurs pourront être rapidement mises à jour lorsque les valeurs observées seront communiquées.

Ces probabilités sont divisées par le Niveau de Performance (NdP) des employés. Dans cette étude, tous les employés ont le même NdP, qui ne varie pas au cours d'une réplication. Les valeurs utilisées sont 0.5, 1, et 2. La comparaison entre les valeurs issues de ces différents scénarios nous permettra d'observer l'impact relatif des RFID suivant le niveau de qualification des employés, leur niveau de sensibilisation et/ou de formation, qui peuvent être très différents suivant les institutions, avec notamment l'utilisation d'employés temporaires. Si la valeur de ce paramètre n'est pas explicitée, les expériences ont été conduites utilisant un NdP égal à 1.

Il serait bien sûr intéressant d'observer le cas où les niveaux de performance des employés varient au fil du temps, afin de prendre en compte par exemple la formation continue -dont l'efficacité pourrait être impactée par des détrompeurs-, ou des facteurs de dégradation de la performance comme la fatigue.

### 3.5.3.2 Scénarios

Le tableau 3.2 contient les paramètres principaux des scénarios observés. La notation des variables est comme suit :

- Durée d'un sous-processus d'information ( $I\_Processus$ ) ;
- Durée d'un sous-processus de vérification, ou contrôle ( $C\_Processus$ ) ;
- Probabilités d'erreur ( $Perror\_Tache$ ) ;
- Nombre de ressources nécessaires à l'accomplissement d'un processus ( $HumRess\_Processus$ ) ;
- Caractéristiques des opérations d'extraction d'ARN (zone, temps de préparation, durée d'attente, processus de finalisation).

Tableau 3.2 – Tableau des principales données définissant les scénarios (non exhaustif)

Paramètres	Valeur			
Nom du scénario	Curr.Scenar	RNA Auto.	RFID & penRdr	RFID & 2DRdr
IReceptTime (min.)	0.75	0.75	0.25	0.25
ITransformation (min.)	1	1	0.5	0.5
CInventory (min.)	20	20	0	0
HumRessCInventory	1	1	0	0
PerrorSampleLeaf	1.1%	1.1%	0.001%	0.001%
PerrorInventory	3%	3%	0.1%	0.01%
HumRessComputerizeLeaf	1	1	0	0
HumRessTransportLeaf	1	1	0	0
AreaRNAProcess	4	2	2	2
SetupRNA (min.)	170	20	20	20
WaitRNAProcess (min.)	0	60	60	60
FinishRNA (min.)	0	20	20	20
$t_{tub}$ (sec.)	N/A	N/A	5	3

Ces scénarios matériels sont à mettre en relation avec les scénarios concernant l'occurrence des re-warehousings. Ceux-ci diffèrent suivant les paramètres que sont :

- La fréquence des re-warehousing prévus ;
- La politique de création des re-warehousing prévus, prenant ou non en compte le long terme ;
- La prise en compte ou non de la contrainte *BoxesPerKind*.

### 3.5.4 Validation

Afin de valider le modèle, nous avons implémenté un mode de fonctionnement interactif de la simulation. Ce mode consiste en une arrivée restreinte à une seule entité. La configuration de cette entité est demandée à l'utilisateur, qui choisira également le type de protocole de transformations à suivre. Les animations entre les blocs du modèle et entre les stations représentées sur la figure 3.15, la présence d'une horloge visuelle ainsi que l'apparition de messages d'information mettant la simulation en pause nous ont permis d'effectuer une validation visuelle, ou

face validity [Sargent 2007], de chaque protocole de transformation à l'aide de professionnels du domaine.

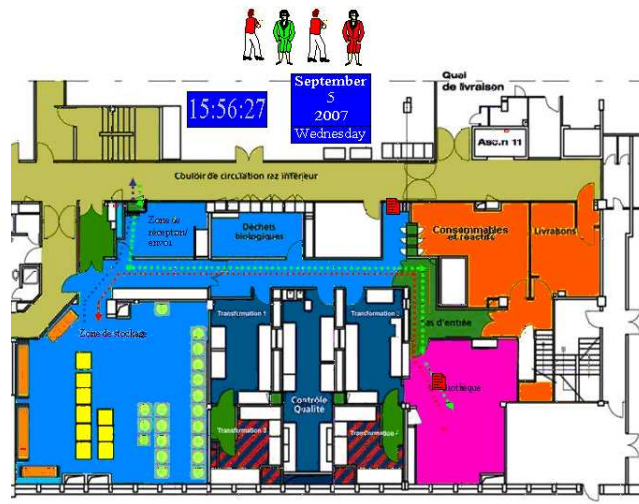


FIGURE 3.15 – Plan de la tumorothèque de l'IPC

Les arrivées ont été décrites comme étant globalement anticipables mais imprévisibles à court terme. L'explication étant que les entrées d'échantillons font suite à des envois par différents services indépendants. Cette description nous a poussés à définir les arrivées comme suivant une loi de probabilité exponentielle. Une augmentation de l'activité ayant également été mentionnée, les paramètres de cette loi varient au cours du temps, au travers de l'ensemble de blocs VBA 90, 91, 92 et 93 reportés dans la figure 3.9. Le passage d'entités dans ces blocs, périodique de délai 24 heures, modifiera les paramètres de la loi pour respectivement en activer l'efficacité, en augmenter la cadence, la réduire et la rendre sans effet. Le nombre total d'arrivées sur une année, paramètre d'entrée du modèle, est ainsi reproduit dans la simulation avec une variation de l'ordre de 3%.

La difficulté d'accéder à ces données sensibles et le caractère prospectif de cette étude n'ont pas joué en faveur d'une observation statistique détaillée pour la modélisation des arrivées. Les demandes de cession d'échantillons en stockage à long terme sont rares pour l'instant. Les prévisions d'augmentation de cette activité nous ont conduit à en augmenter le nombre ; le choix de les faire apparaître suivant une loi exponentielle est naturel vu le caractère pour l'instant imprévisible de ces possible arrivées de demandes.

Concernant l'algorithme de re-warehousing, plusieurs tests "logiques" ont été effectués. L'utilisation de la Limite Critique (Section 3.4.4.3) a d'abord été utilisée pour la vérification du bon fonctionnement de la partie de l'algorithme décidant la possibilité d'une réaffectation d'emplacements de boîte(s) avant d'être un élément de cette décision. La condition  $T_{box} \cdot \left\lceil \frac{X}{N_{tpb} - X} + 1 \right\rceil + X \cdot T_{tub} \leq T_{MAX}$  ne devant jamais être violée si une occurrence de re-warehousing réalisable était trouvée.

Des tests ont également été effectués avec une définition de  $T_{MAX}$  grande. Le résultat attendu

de ce test était une utilisation de l'espace de stockage proche des 100%, quelle que soit la méthode utilisée. Cette valeur a été atteinte en utilisant l'approche "myope", qui consiste en la concaténation des boîtes les moins remplies entre elles. Il restait à la fin des tests moins de 100 emplacements libres dans l'espace de stockage à azote (la capacité des boîtes étant de 100 tubes). Des observations concernant le stock total ont également été effectuées, et ont vérifié que le nombre de tubes présents avant un re-warehousing est bien égal au nombre de tubes à la fin de celui-ci.

Comme nous l'avons vu, les probabilités d'erreurs utilisées sont issues de la littérature puis de discussions avec les partenaires hospitaliers. Les informations dans leurs bases de données comparées avec des observations sur place n'ont pas permis de définir plus précisément les différentes probabilités d'erreurs par étape pour deux raisons. Premièrement, plusieurs types d'erreurs peuvent mener à une même différence entre le stock physique et celui renseigné dans le système d'information. Deuxièmement, le stock étant composé d'échantillons récoltés depuis de nombreuses années pendant lesquelles le fonctionnement de la tumorothèque observée a évolué. Pour être significatif, le nombre nécessaire d'observations à effectuer sur place aurait été très important et la cause des différences entre stock physique et le SI n'aurait pas forcément identifiable.

Le nombre de réplifications observées pour obtenir les résultats décrits Section 3.5.5 suit les directives issues de [Kelton et al. 2007]. La demi-largeur de l'intervalle de confiance observé suite à une tentative de 25 réplifications a mené à la recommandation d'effectuer 48 réplifications afin d'être sûr à 95% que le taux d'utilisation des ressources ne varierait pas de plus de 0.2%. Nous avons donc effectué 50 réplifications de chaque scénario pour obtenir les résultats présentés ci-après.

### 3.5.5 Résultats

Les scénarios décrits ci-dessus ont été observés au travers d'un ensemble de réplifications de neuf mois chacune. Chaque scénario a utilisé le même ensemble de stocks initiaux, générés au préalable en fonction de données décrites dans la section 3.5.3 issues de l'Institut Paoli Calmettes. Les résultats expérimentaux ont été rapportés dans les tableaux 3.3, 3.4 et 3.5, illustrés graphiquement par les figures 3.16, 3.17 et 3.18.

Les notations utilisées dans les tableaux de résultats sont similaires à celles définies dans la section 3.5.3.2 auxquels des arguments ont été ajoutés. *Re-Wa* correspond au cas dans lequel les déclencheurs d'urgence (*emTrigger*) et planifié hebdomadairement (*plannedTrigger*) sont activés. La contrainte imposant aux boîtes de ne contenir qu'un type d'échantillons (*BoxPerType*) est activée par défaut. L'argument "No *BPT*" explicite la non prise en compte de cette contrainte. *Emergency only* correspond à l'absence de re-warehousings planifiés. L'algorithme utilisé est par défaut l'algorithme "intuitif" ; les arguments "& opti. targets" et "& longTerm" correspondent à la prise en compte du Boxes Shifting et de l'algorithme 1, décrits section 3.4.4. Rappelons que les scénarios sans RFID n'implémentent jamais de re-warehousing.

Les valeurs reportées dans le Tableau 3.3 et la figure 3.16 sont les temps de processing relevés à différentes étapes (Processing Times), les pourcentages d'erreurs d'inventoriage ("Inv. error") et de saisie informatique ("Comp. error"), le taux d'utilisation des ressources (*Human*

*resource utilization*) et le nombre de racks ayant dû être utilisés (*Storage racks bought*).

La proportion d'utilisation des ressources humaines est de 51.7% dans le cas de *Curr.Scenar*, ce qui reste réaliste car les employés ont également des tâches à accomplir dans d'autres services et vue l'irrégularité de la charge de travail. Une économie d'un peu plus de 10% est réalisée en investissant dans un automate d'extraction d'ADN/ARN (*Hum. Ress. Used* = 45.21%). L'ajout de RFID a plus d'impact sur cet indicateur que l'automate, puisqu'il permet de réduire l'indicateur d'environ 30%. L'implémentation de l'activité de re-warehousing a un effet inverse, bien que très limité (de l'ordre d'un demi pourcent), sur cet indicateur. L'augmentation de l'utilisation des ressources a alors un impact fort bénéfique sur l'ensemble du système puisqu'il permet d'économiser environ 20% de l'espace de stockage initialement nécessaire. Les résultats concernant cet indicateur seront plus précisément décrits dans le tableau 3.5. Les résultats concernant les temps de processing sont similaires. Les délais de mise à jour de la base de données sont considérablement réduits lorsque l'on rend les objets auto-communicants, ce à quoi on pouvait s'attendre puisque les copies manuelles, transports de fiches et saisies informatiques n'ont plus lieu d'être.

Il est important de remarquer que la réduction du taux d'utilisation des ressources est principalement due au retrait de tâches peu valorisantes pour le personnel car n'utilisant aucunement leurs compétences propres. La réduction du *Throughput Time* révèle que les gains de temps résultent également en une accélération du traitement des prélèvements, ce qui est une importante mesure de la qualité. Enfin, remarquons que l'impact du type d'antenne utilisée n'a que peu d'influence sur ces indicateurs.

Tableau 3.3 – Performance des scénarios principaux

Scénario	Durées			Erreurs		# Racks Achetés	Ress. Hum. Utilisées
	IS Fulfillment	Transformation	Throughput	Informatisation	Inventoriage		
Curr.Scenar	3.06h	5.94h	2.09h	1.1%	3.03%	24.09	51.74%
RNA Automaton	2.69h	5.27h	1.71h	1.15%	2.96%	24.24	45.21%
Pen-Rder & No re-Wa	0.35h	1.63h	1.61h	0.01%	0.15%	24.19	32.37%
2DRder & No re-Wa	0.35h	1.62h	1.61h	0.01%	0.01%	24.12	31.61%
pen-Rder & Re-Wa	0.35h	1.63h	1.61h	0.01%	0.06%	19.86	32.61%
2DRder & Re-Wa	0.35h	1.62h	1.61h	0.01%	0.01%	19.84	31.93%

Le tableau 3.4 et le figure 3.17 montrent l'importance du Niveau de Performance (NdP) au travers de son impact sur le nombre d'erreurs observés. Les scénarios avec les différentes approches de re-warehousing n'apparaissent pas dans ce tableau de résultats parce que leur mise en place n'impacte pas significativement ces indicateurs. Les scénarios sans RFID (*Curr.Scenar* et *RNA Auto.*) nécessitent une grande part d'intervention humaine ; les technologies RFID permettent d'automatiser de nombreux processus critiques comme la copie manuelle d'information et la saisie informatique dactylographiée, le NdP a donc un impact amoindri dans ces cas là. En complément à ces valeurs, la figure 3.17 reporte les taux d'erreurs relatifs par scénario suivant le NdP. La forme des courbes des pourcentages d'erreurs relatives montre bien que l'on tirera plus de bénéfices à implémenter un système de détrompeurs basé sur les RFID dans des structures

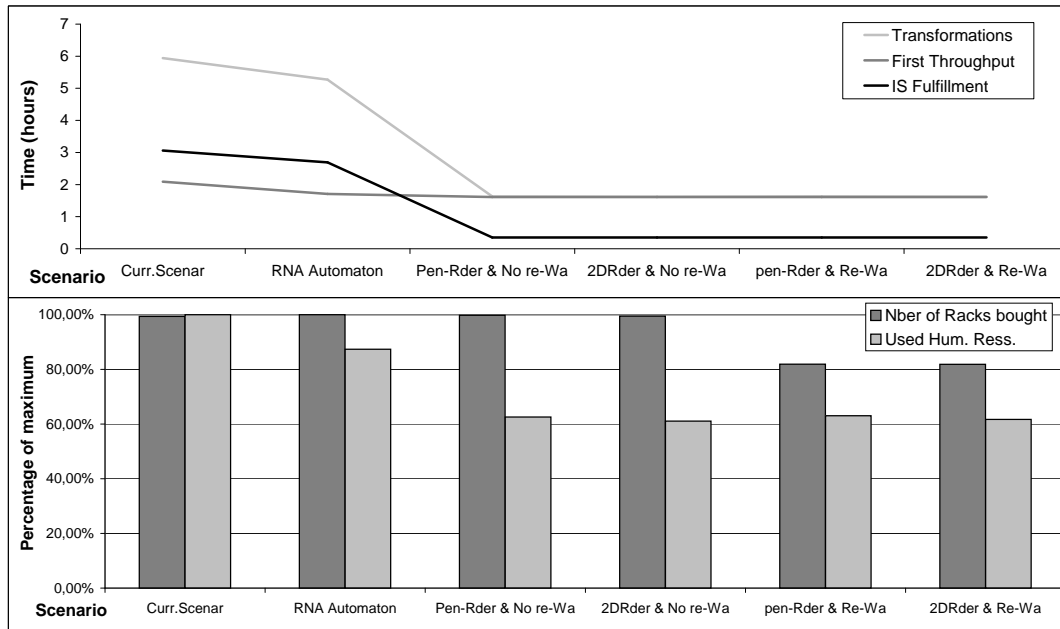


FIGURE 3.16 – Performance des scénarios principaux : Processing Times (en haut), et pourcentages d'utilisation des ressources humaines et du nombre de racks achetés par rapport au maximum (en bas)

ou régions qui ont le moins de possibilités de recrutement de personnel qualifié, sensibilisé et expérimenté, ou simplement qui ont une charge de travail très élevée, ce qui ne sera sûrement pas le cas pour des raisons financières évidentes (les structures en manque de personnel n'ont sûrement pas les moyens d'investir dans des technologies fort coûteuses...).

Le tableau 3.5 et la figure 3.18 associée se focalisent sur les impacts de différentes décisions possibles concernant le re-warehousing. Les scénarios sont comparés au travers des trois stocks initiaux décrits dans la section 3.5.3. Les observations sont :

- Le nombre moyen d'*emTrigger* déclenchés (Number Launched) et le nombre moyen de fois où ce déclencheur n'a pas mené à la réaffectation des tubes d'une boîte (# Failed) assorti de son écart-type. La valeur moyenne de #Failed correspond au nombre de fois où il a fallu acheter un rack supplémentaire ; pour cette raison, cet indicateur est spécifié en gras.
- Le nombre moyen de boîtes vidées pendant les re-warehousings planifiés (# Free Boxes) et le nombre de re-warehousings planifiés n'ayant pas eu lieu pour non existence de solutions (# Canceled). Dans ce cas, le temps de processing est bien entendu nul.

Une première tendance observable au travers du tableau 3.5 concerne l'impact de l'état des stocks initiaux. Quel que soit le scénario, environ vingt racks sont nécessaires dans le cas d'un stock initial vide, alors qu'aucun rack supplémentaire n'est nécessaire dans le cas d'un stock initial à 77.5% plein, et une faible quantité de racks (autour d'une unité) sont achetés dans le cas d'un stock initial rempli à 81%.

Démarrer avec un stock vide correspond à la pire situation pour re-warehousing. Elle cor-



Tableau 3.4 – Erreurs observées sur les scénarios sans re-warehousing suivant le Niveau de Performance (NdP) des employés.

Scenarios		Erreurs d'inventaire			Erreurs d'informatisation		
Scénario matériel	NdP	Moy.	Min.	Max.	Moy.	Min.	Max.
Curr.Scenar	0.5	6.02%	3.45%	9.54%	2.23%	1.81%	2.65%
Curr.Scenar	1	3.03%	0.72%	4.98%	1.1%	0.81%	1.39%
Curr.Scenar	2	1.51%	0.35%	3.46%	0.57%	0.37%	0.8%
RNA Automaton	0.5	6.27%	2.91%	10.14%	2.3%	1.96%	2.64%
RNA Automaton	1	2.96%	1.06%	5.28%	1.16%	0.94%	1.49%
RNA Automaton	2	1.5%	0%	3.16%	0.57%	0.41%	0.79%
RFID & pen-Rder	0.5	0.25%	0%	1.03%	0.02%	0%	0.06%
RFID & pen-Rder	1	0.15%	0%	1.05%	0.01%	0%	0.05%
RFID & pen-Rder	2	0.1%	0%	0.7%	≤ 0.01%	0%	0.03%
RFID & 2DRder	0.5	0.1%	0%	0.36%	0.02%	0%	0.08%
RFID & 2DRder	1	0.01%	0%	0.35%	0.01%	0%	0.05%
RFID & 2DRder	2	≤ 0.01%	0%	0.35%	≤ 0.01%	0%	0.06%

respond au cas où chaque boîte est pleine au début de la simulation, ou bien au cas où le stock est vraiment vide. En revanche, avec un niveau initial de 77,5%, des emplacements vides dans les boîtes sont suffisamment nombreuses pour que l'achat de nouveaux racks ne soit jamais nécessaire. Un niveau de stock initial de 81% définit un compromis entre ces deux situations extrêmes. Il est à noter que ces valeurs dépendent des taux d'arrivée des échantillons et du taux de demande de cessions définis pour la simulation. Un phénomène n'est pas explicitement indiqué dans le tableau : Le niveau de stock initial impacte à peine le nombre de nouveaux supports nécessaires en l'absence de politique de re-warehousing. En effet, des places vides présentes dans la zone de stockage ne peuvent plus être exploitées dans ce dernier cas (qui correspond en fait à la situation réelle). Quel que soit le niveau de stock initial, le nombre de nouveaux racks nécessaires est alors d'environ 24, comme on peut le voir dans le tableau 3.3. Sur le long terme, une fois qu'un nombre important de cryotubes ont été taggés, le tableau 3.5 montre que le re-warehousing est un moyen efficace de limiter l'expansion des biobanques sans avoir à se débarrasser d'ensembles d'échantillons. Rappelons que ces observations sont effectuées sur une simulation d'une année ; continuer la simulation sur un second exercice reviendrait à partir d'un stock ayant une proportion de remplissage proche de 100%.

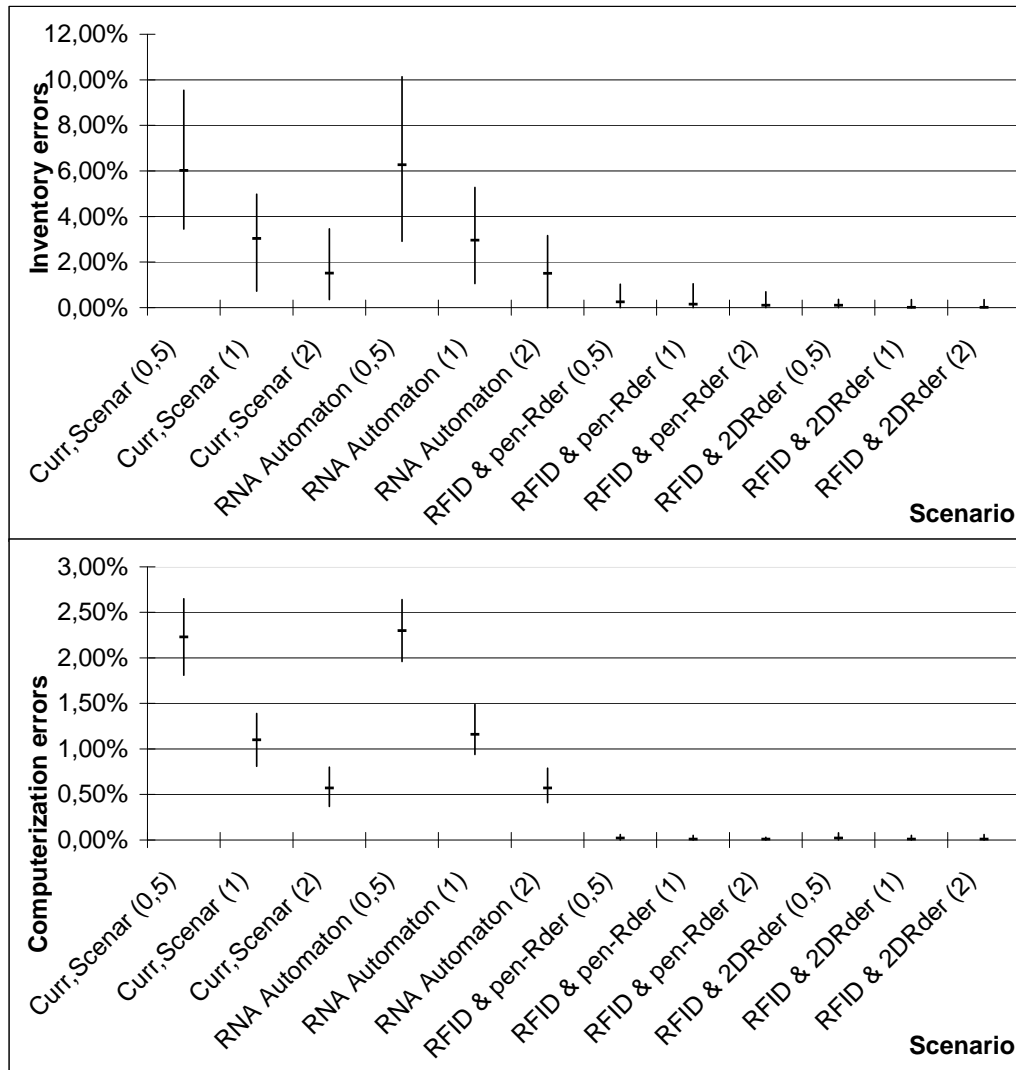


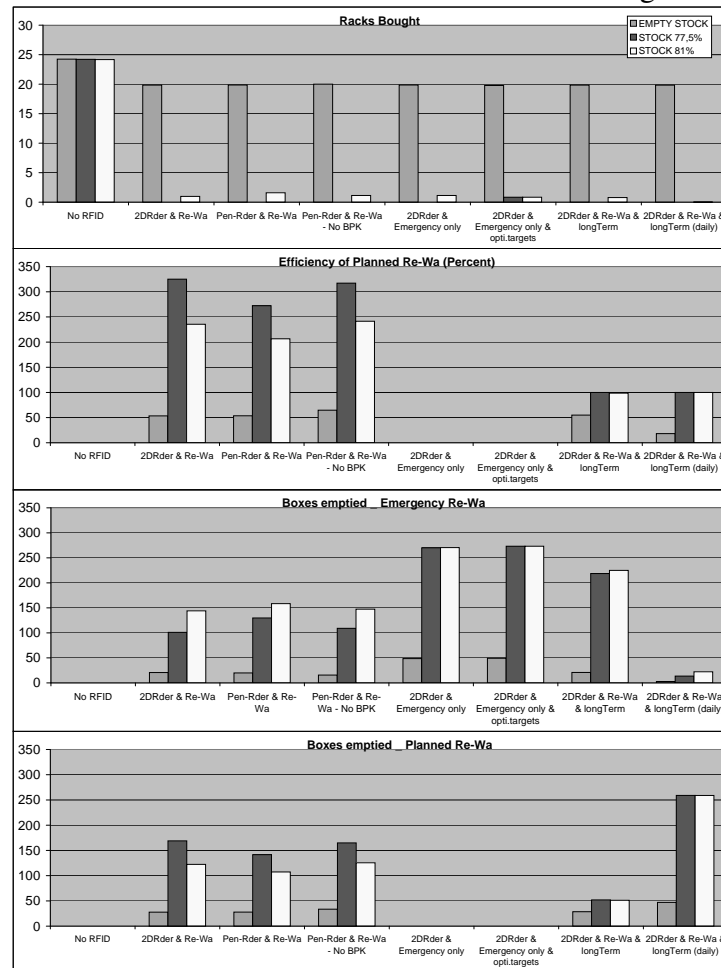
FIGURE 3.17 – Observed Errors on the Non-Rewarehousing Scenarios, depending on Employee Performance Level (EPL)



Tableau 3.5 – Comparaison des configurations concernant le Re-Warehousing

Initial stock		Empty Stock				77.5%				81%			
Scenario name		Emergency Trigger Number launched	# Failed Avg.	(→New Rack) σ	Planned #FreeBoxes #Canceled	Emergency Trigger Number launched	# Failed Avg.	(→New Rack) σ	Planned #FreeBoxes #Canceled	Emergency Trigger Number launched	# Failed Avg.	(→New Rack) σ	Planned #FreeBoxes #Canceled
No RFID		24.24	<b>24.24</b>	0.54	N/A	24.21	<b>24.21</b>	0.45	N/A	24.17	<b>24.17</b>	0.38	N/A
2DRder & Re-Wa		40.52	<b>19.84</b>	0.51	$\frac{27.76}{24.24}$	101.04	<b>0</b>	0	$\frac{169.2}{0}$	145.06	<b>0.98</b>	0.55	$\frac{122.42}{0.88}$
Pen-Rder & Re-Wa		39.74	<b>19.86</b>	0.53	$\frac{27.86}{24.14}$	129.86	<b>0</b>	0	$\frac{141.61}{0}$	160.1	<b>1.6</b>	0.64	$\frac{107.4}{1.52}$
2DRder & Re-Wa _ No BPK		35.62	<b>20</b>	0.49	$\frac{33.64}{18.36}$	109.14	<b>0</b>	0	$\frac{164.94}{0}$	148.52	<b>1.14</b>	0.45	$\frac{125.54}{1.24}$
2DRder & Emergency only		68.42	<b>19.86</b>	0.57	N/A	270.14	<b>0</b>	0	N/A	271.68	<b>1.14</b>	0.15	N/A
2DRder & Emergency only & opti. targets		69.08	<b>19.78</b>	0.46	N/A	274.1	<b>0.84</b>	0.51	N/A	274.1	<b>0.84</b>	0.51	N/A
2DRder & Re-Wa & longTerm		40.74	<b>19.84</b>	0.55	$\frac{28.6}{23.4}$	218.61	<b>0</b>	0	$\frac{52}{0}$	225.72	<b>0.78</b>	0.58	$\frac{51.26}{0.74}$
2DRder & Re-Wa & longTerm (daily)		22.69	<b>19.837</b>	0.47	$\frac{47.06}{211.94}$	13.65	<b>0</b>	0	$\frac{259}{0}$	22.24	<b>0.02</b>	0.14	$\frac{258.9}{0.1}$

FIGURE 3.18 – Results on Re-Warehousing



La comparaison entre les deux technologies d'inventariage montre l'intérêt de l'antenne X/Y : le nombre de re-warehousings effectués en urgence est moins important lorsque l'on utilise une antenne X/Y car celle-ci permet de libérer plus de boîtes lors de re-warehousings planifiés. Cela dit, l'impact de cette technologie sur le nombre de racks nécessaires est très limité.

Ne pas prendre en compte la contrainte *BoîtesParType* (*2DRder & Re-Wa* comparé à *2DRder & Re-Wa \_ No BPT*) a à première vue des effets inattendus. Alors que l'on pourrait espérer une plus grande efficacité, les résultats sont au mieux légèrement améliorés, et parfois détériorés. Cela est dû au fait que le stock transitoire est réduit car il n'y apparaît alors qu'une seule boîte au lieu d'une boîte par type. Une correction envisageable pour éviter ce piège d'interprétation consisterait à obliger la simulation à stocker tout le stock transitoire en fin de réplcation.

Si le re-warehousing n'apparaît que suite à des déclencheur d'urgence, (*2DRder & Re-Wa* comparé à *2DRder & emergency only*), le nombre de ces déclencheurs augmente évidemment considérablement. Par exemple ; dans le pire des cas ("77.5%" initial stock level), on peut voir passer le nombre de ses occurrences de 2 à 5 par semaine. Le processus induit par ce déclencheur

paraît cependant assez efficace pour approcher la quantité de racks nécessaires du cas où des re-warehousings sont planifiés. On aura malgré tout intérêt à voir la charge induite par les re-warehousings maîtrisée afin d'éviter que ce processus, dont la durée peut grandement varier lorsqu'il est déclenché en urgence, n'ait lieu pendant des périodes de grande affluence.

Le dernier scénario observé concerne une modification de l'algorithme de re-warehousing (*2DRder & Re-Wa* comparé à *2DRder & Re-Wa & long Term*). Ainsi que détaillé dans la section 3.4, l'*algorithme intuitif* a une vision myope de l'optimisation du stock. L'algorithme à *Long Terme* a été créé pour contrer ce comportement. Avec ce second algorithme, moins de boîtes sont vidées lors des re-warehousings prévus (une boîte par occurrence au lieu de 2 ou 3 en moyenne lorsque l'algorithme "Intuitif" est appliqué aux stocks pleins à "81%" et "77.5%"). Le nombre d'*EmTrigger* augmente également, mais la réaffectation des tubes est plus efficace et moins de racks sont finalement nécessaires. Une planification quotidienne de l'activité de re-warehousing laisse percevoir l'intérêt de l'algorithme *Long Terme* qui, bien que ne permettant de libérer qu'un emplacement de boîte, annule quasiment toute occurrence d'*EmTrigger* et ne nécessite l'achat de presque aucun rack.

### 3.6 Conclusions et perspectives

Cette première étude de cas porte sur l'impact des technologies RFID dans un sous-système hospitalier particulier. La simulation à événements discrets nous a permis d'implémenter des indicateurs de performance adaptés au système étudié et aux modifications de ce système relatives à l'utilisation d'objets auto-communicants.

Les premiers résultats présentés ici (temps par étape, utilisation des ressources humaines, erreurs observées), au vue des suppositions émises et des paramètres utilisés, montrent le gain de performance significatif suite à l'utilisation de technologies RFID. Une autre possibilité apportée par les technologies d'auto-identification concerne l'activité de "re-warehousing". Cette activité, qui permet d'améliorer le rendement des espaces de stockage en réaffectant les emplacements de cryotubes vides, porte un risque de dégradation du contenu des cryotubes. Elle ne peut que difficilement être mise en place sans l'utilisation d'un matériel d'identification spécifique. Nous avons proposé ici plusieurs politiques de mise en place d'un protocole de re-warehousing sûr. Les résultats montrent pour cette activité un important potentiel économique et que, plus généralement, le reengineering doit être une étape importante de la conception et de l'évaluation de solutions RFID.

Une approche de modélisation a été proposée, séparant les processus d'information et de vérification des processus principaux (de l'acte médical). Elle paraît particulièrement adaptée aux problèmes d'intégration de nouvelles technologies d'information et de communication et pourrait être réutilisée dans d'autres systèmes de production ou services hospitaliers. Cette approche permet d'obtenir un modèle facilement reconfigurable. Les modifications de paramètres pouvant porter sur des paramètres dus aux ensembles technologiques considérés ou des modifications à apporter pour procéder à une étude similaire dans une biobanque différente. Des modifications plus avancées seraient nécessaires à l'expérimentation de biobanques incluant d'autres protocoles de transformation des échantillons ou des changements organisationnels. Un tel outil peut être intéressant pour les structures similaires désireuses d'évaluer les apports

de la mise en place d'une solution RFID, que ce soit pour des raisons légales, de qualité ou l'optimisation de leur logistique.

Plusieurs perspectives sont mises en relief par ce travail. La définition et l'implémentation d'une interface graphique pourrait permettre de transformer ce modèle en un outil d'évaluation de différentes décisions stratégiques destiné aux gestionnaires de biobanques. L'intégration dans ce modèle de services interagissant directement avec les biobanques permettrait d'avoir une vue plus large sur l'activité autour d'elles et d'évaluer l'impact global de l'adoption de technologies d'auto-identification dans un réseau de services. Concernant l'activité de re-warehousing, plusieurs pistes de recherche sont ouvertes. Différents déclencheurs pourraient être ajoutés et évalués, intégrant par exemple des traits dynamiques comme la prévision des arrivées ou l'intégration du processus à la préparation de déstockages. Le protocole défini n'est pas la seule façon de procéder, la possibilité de déstocker et resotcker des boîtes en cours de manipulation ou l'utilisation de plusieurs ressources simultanément peuvent mener à une plus grande efficacité. Ces possibilités offrent une variété de problèmes d'optimisation combinatoire originaux pour lesquels des méthodes de résolution restent à définir.

D'un point de vue méthodologique, la granularité du modèle pourrait être améliorée en prenant en compte plus finement les ressources humaines et la gestion des données. L'utilisation de deux bases de données peut permettre de modéliser avec une grande finesse les différences entre l'information réelle et l'information enregistrée dans le système d'informations du modèle. De petites modifications peuvent apparaître dans le système d'informations suivant l'étape et le type d'erreur effectuée. Cela nécessite toutefois un gros effort de collecte de données pour une configuration réaliste, rendue difficile par le fait que différentes erreurs peuvent résulter en une même différence entre le système réel et la base de données. On trouvera un intérêt à utiliser une modélisation orientée agents des ressources, pour la génération des incidents menant à ces erreurs et des facteurs de dégradation de la performance, ainsi que l'implémentation de routines de correction des incidents et erreurs. Une conséquence importante, qui fut rédhibitoire dans notre cas, de l'utilisation de deux bases de données est que le temps de déroulement d'un scénario augmente beaucoup. [Eder et al. \[2009\]](#) propose un modèle de bases de données adaptée à tous les types de banques d'échantillons biologiques, qu'il conviendrait d'utiliser pour créer un outil des plus adaptables.



## Chapitre 4

# Évaluation des apports des technologies RFID pour les traitements chimiothérapiques

Dans cette partie, nous nous efforcerons de déterminer des améliorations réalistes qui peuvent être appliquées aux systèmes de production et d'administration de solutions injectables, plus particulièrement des chimiothérapies.

La production des traitements chimiothérapiques implique, comme tout système de production, des activités d'approvisionnement, de stockage, de gestion des ressources ou encore de livraison. La première partie de ce chapitre est consacrée à la description des contraintes particulières régissant ces systèmes, et décrit plus particulièrement le fonctionnement de la structure partenaire du projet MISTRALS : la pharmacie oncologique du Centre Hospitalier Universitaire de Nice (CHU-N). Nous y présentons également un ensemble de pistes d'amélioration de son fonctionnement, dont certaines nécessitent l'utilisation de NTIC, qui justifient notre volonté de proposer un outil configurable d'estimation de sa performance.

La première étude, présentée section 4.2, présente les apports génériques relatifs à l'utilisation des RFID au niveau des produits initiaux et des poches de produits finis. Cette étude propose des modifications au niveau de la logistique et des flux physiques, et propose un outil permettant d'observer à un niveau macroscopique les apports liés à l'utilisation des technologies communicantes pour la traçabilité des produits initiaux et préparations.

La seconde étude (section 4.3) se focalise sur le processus de production pharmaceutique, ayant lieu sous isolateur. Nous y proposons une stratégie d'ordonnancement visant à maximiser la formation du personnel ; l'objectif étant de contrôler le ratio entre la qualité de service et la robustesse du système face au risque du à un manque de personnel et à une soudaine augmentation de la demande.

### 4.1 Le CHU de Nice

Cette section décrit brièvement l'organisation du CHU de Nice, puis plus précisément les processus de fabrication de cytotoxiques. Nos deux principaux collaborateurs hospitaliers dans

le cadre de cette étude sont pharmaciens à l'Hôpital de l'Archet 2, structure faisant partie du CHU de Nice : Rémy Collomp, pharmacien gérant, et Nassir Mirfendereski, pharmacien hospitalier spécialiste des préparations chimiothérapiques.

Le Centre Hospitalier Universitaire de Nice est un établissement public de santé, actuellement composé de cinq structures, dont quatre alimentées directement par la Pharmacie Centrale "Saint André".

- L'Hôpital de Tende, situé à environ 80 km
- Les établissements de l'Archer 1 et 2, qui sont côte à côte ;
- L'Hôpital Saint Roch ;
- L'Hôpital Pasteur 1,
- L'Hôpital Cimiez.

Les divers fournisseurs alimentent la *pharmacie centrale* Saint André, qui se charge de redistribuer les biens aux différents hôpitaux suivant leurs commandes, à l'exception de l'Hôpital Cimiez, qui est alimenté par l'intermédiaire de la pharmacie de l'Hôpital Pasteur.

Dans un avenir assez proche, l'Hôpital Pasteur sera remplacé par l'Hôpital Pasteur 2, ou "Hôpital du futur", localisé à l'est de Nice. Les derniers livrables de celui-ci étaient initialement prévus pour Mars 2013.

Un rapprochement entre le site de l'Archet et le Groupement de Coopération Sanitaire (GCS) Lenval, qui est une structure privée à but non lucratif d'intérêt public qui accueille la majorité des consultations pédiatriques niçoises, est également en cours.

Une question, dans le cadre de la réforme des hôpitaux et vu le succès de projets comme HRP<sup>2</sup> (Hôpitaux : Regroupement, Partage et Pilotage), porte sur la mutualisation des ressources. Il est par exemple question de profiter du savoir-faire du service de pharmacotechnie de Pasteur 2 pour y effectuer l'ensemble de préparations médicamenteuses périnatales. Ce type de structures et de collaborations étant vouées à se développer, il est important de savoir apprécier l'aboutissement de telles organisations.

La question de l'étendue du partenariat entre la pharmacie de l'Archet et des autres établissements reste d'actualité, et on peut imaginer centraliser la préparation de certains injectables. Les produits dont la manipulation s'effectue formellement dans un isolateur pourraient par exemple être tous produits à l'Archet alors que d'autres, moins contraignants car moins nocifs, peuvent se préparer sous une hotte, moins coûteuse et dont l'installation est plus aisément envisageable dans d'autres structures. La question de la main-d'œuvre reste cependant en suspens. L'utilisation de la hotte à l'Hôpital de l'Archet est actuellement réservée au cas exceptionnels de panne de l'isolateur ; le nombre de ressources humaines n'étant pas suffisant pour utiliser les deux dispositifs simultanément.

Les problématiques soulevées ici ne sont pas propres au CHU de Nice, la mutualisation de services étant un moyen efficace pour réduire les coûts de fonctionnement des hôpitaux, qui est un objectif majeur des politiques actuelles. Le section suivante décrit plus précisément le fonctionnement de la pharmacie oncologique de l'hôpital de l'Archet.

#### 4.1.1 La pharmacie oncologique du CHU de Nice

Cette section décrit l'ensemble des activités nécessaires à la préparation des poches de traitement chimiothérapiques.

La préparation de solutions injectables, pour les traitements chimiothérapiques notamment, est soumise à un ensemble de normes et contraintes de qualité et de sécurité à respecter. Certains produits nécessitent l'observation de contraintes additionnelles, leur labilité pouvant être accentuée par leur sensibilité à la chaleur, ou plus exceptionnellement à la lumière.

La description suivante des traitements chimiothérapiques est composée de plusieurs étapes successives. Elle est issue d'une part du descriptif inclus dans le cahier des charges de la partie "Pharma" du projet MISTRALS, et d'autre part d'observations effectuées lors de plusieurs visites de la pharmacie de l'Archet 2 du CHU de Nice à de nombreuses occasions. Certains points de détail mentionnés dans la description suivante sont propres à la pharmacie partenaire, mais le diagramme des processus 4.1 et l'enchaînement des processus sont généralisables à d'autres services similaires [Mazier et al. 2010; Collomp et al. 2007; Bekoune et al. 2009].

Un épisode de traitement chimiothérapique inclut 7 étapes successives que sont la prescription (1), la validation pharmaceutique (2), la fabrication (3), le transport (4), l'administration (5), le suivi (6) et la destruction des déchets (7). En parallèle se déroulent des activités telles la gestion des stocks, la gestion des ressources humaines ou encore l'élaboration de plans de respect des conformités. La suite décrit plus précisément les processus nécessaires à la production de cytotoxiques tels qu'ils étaient effectués lors de nos premières visites à la pharmacie oncologique du CHU-N. La gestion des stocks est une activité parallèle, on la retrouve comme une étape précise dans le diagramme (figure 4.1) issu de [Housseman et al. 2008].

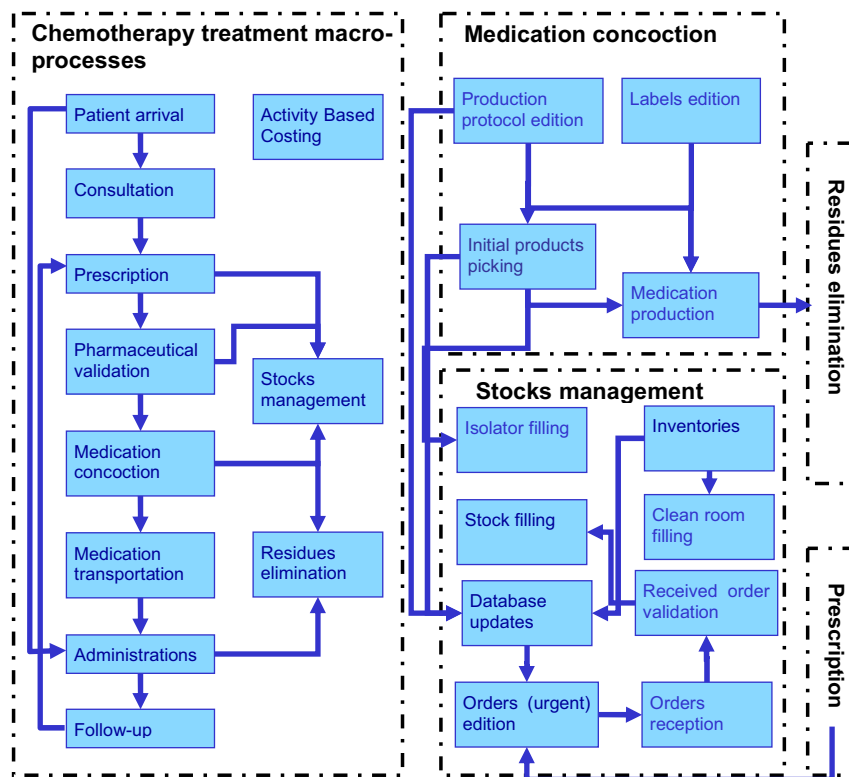


FIGURE 4.1 – Diagramme des activités pour la préparation de cytotoxiques



La suite de cette section décrit plus particulièrement certains de ces processus, propose des pistes d'amélioration et décrit de possibles apports des technologies de radio-identification.

#### 4.1.1.1 Gestion des Stocks

La pharmacie oncologique de l'Archet 2 contient et manipule en 2009 approximativement 130 substances actives différentes. Le réapprovisionnement du stock est basé sur l'utilisation de fiches (figure 4.2) comportant le nom du produit. La mention "Frigo" est écrite à la main si celui-ci doit être stocké à basse température. Le stock de sécurité nécessaire (seuil d'alerte et stock minimum) figurent également au recto de ces fiches. Les dates des dernières réceptions, ainsi que les quantités reçues et les numéros de bordereaux correspondants sont inscrits au verso de la fiche. Une commande est lancée lorsqu'un préparateur observe que la quantité d'un produit restant est inférieure à la quantité de sécurité. Cette observation peut avoir lieu par exemple à l'occasion du picking dudit produit ou bien lors des inventaires, qui ont lieu hebdomadairement dans cette pharmacie.

N° CODE

2009

L  
S - 433703  
MABTHERA 100 MG FI  
INJ

Frigo

LIBELLE GERICO :

BORDEREAU I part

STOCK MINIMUM : 200

SEUIL D'ALERTE :

PAOARC0250

N° Lot					
Date	Quantité	N° Bordereau	Date	Quantité	N° Bordereau
01 02	30	22519	02 04	60	276030
02 07	30	22532	02 19	50	26077
02 19	60	22524			
02 19	40	226002			
03 02	50	26175	04 02	50	26246
03 12	50	26160	04 10	50	26275
03 14	50	26208	04 30	50	26340
05 06	50	26361	06 03	50	26376
05 20	50	26381			
07			08		
09			10		
11			12		

FIGURE 4.2 – Fiche d'inventaire de la pharmacie de l'Archet2.

Il est possible de passer des commandes journalières, les fiches de commande étant données au chauffeur de la pharmacie centrale lors de la livraison.

Il est également possible d'effectuer des commandes en urgence, par téléphone ou par FAX. Dans ce cas, les produits additionnels seront inclus à la prochaine livraison prévue si les produits sont en stock à la pharmacie centrale, et pourront l'être dès le lendemain dans le cas contraire. Les doubles des bordereaux de commandes (figure 4.2) sont conservés en évidence jusqu'à réception des produits commandés. La bannette prévue à cet effet se trouve à l'entrée du *Bureau des pharmaciens* (figure 4.3). Les bordereaux seront replacés à proximité des produits lors de la réception de la commande. Ceci permet de vérifier que même si une fiche n'est pas présente à l'emplacement du stockage de son produit, elle n'est pas perdue, et de connaître la liste des

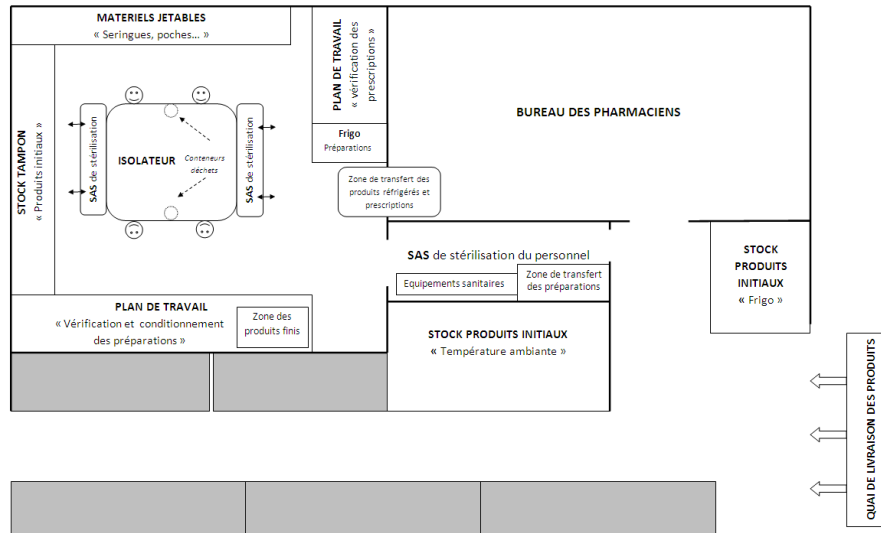


FIGURE 4.3 – Plan de la salle de l'isolateur, pharmacie de l'Archet2 [El Yousfi 2010]

produits en attente de livraison relativement rapidement. Pour les consommables et Dispositifs Médicaux (DM), le même système de fiches est en place. Les livraisons ont lieu une fois par semaine, mais un délai supplémentaire peut apparaître suivant le type de matériel demandé. Il est à noter que certains DM doivent être re-stérilisés avant utilisation. L'absence d'une fiche peut être interprétée comme le fait qu'une commande est en cours. L'absence de vérification de la présence de cette fiche dans la bannette des commandes en cours peut mener à une rupture de stock.

Certains produits particuliers (les plus onéreux et les plus labiles) ne sont commandés que lorsqu'ils ont été prescrits et peuvent disposer de leur propre espace de stockage. C'est également le cas des produits en essai clinique, auxquels est attribuée une zone de stockage particulière. Ces produits sont traités en double aveugle, les pharmaciens eux-mêmes ne connaissant pas le contenu des flacons et préparations.

Un cas d'erreur rapporté par les pharmaciens est le suivant : deux commandes successives sont envoyées au fournisseur, et la seconde est annulée par ce dernier, pensant que "c'est la même commande arrivée deux fois".

L'automatisation de la gestion des stocks et de l'envoi de commandes de réapprovisionnement permettrait la réduction de ce type d'erreurs. La nécessité de constamment vérifier le niveau des stocks et le niveau de stock minimum pourrait être réduite via une automatisation de la traçabilité des produits utilisés. Durant l'avancement du projet MISTRALS, plusieurs difficultés se sont présentées aux technologues. Le fait que les armoires contenant les médicaments soient métalliques, la présence de solutés, de blisters, et le fait que les flacons soient de dimensions très variées compliquent la lecture des étiquettes RFID et la définition d'une solution efficace.

La taille très variable des flacons pousserait les offreurs de solutions RFID à utiliser une étiquette adaptable aux plus petits. Une solution consisterait en l'utilisation d'étiquettes dotées

d'antennes de faible diamètre, comme cela est le cas pour les cryotubes ; ce choix réduirait toutefois la distance de lecture et donc les gains de temps de lecture par rapport à l'utilisation de codes barres. Une proposition qui peut convenir à tous est d'utiliser une étiquette de plus grande taille, qui sera disposée "en drapeau" sur les plus petits flacons. Une informatisation complète du système pourrait également aboutir à une optimisation de l'alimentation de la zone de production au travers d'une sélection des volumes des produits adaptée à la demande journalière. Il est en effet possible d'utiliser les reliquats d'un produit au cours d'une même journée, mais ils seront tous jetés le soir.

La réception des produits a lieu du côté du "quai de livraison des produits" (figure 4.3). Le fait que certains produits soient transportés en vrac dans un carton et les possibilités d'interférences citées ci-dessus rendent nécessaire l'utilisation d'un tunnel de lecture RFID pour parvenir à un taux de lecture acceptable. Les produits à destination du service chimiothérapie sont séparés des produits pharmaceutiques 'normaux' par les manutentionnaires. Les produits dédiés à la pharmacie oncologique sont ensuite vérifiés par les préparateurs, alors que le livreur est déjà parti avec les nouvelles fiches de commande.

Un inventaire du stock de médicaments a lieu toutes les semaines, ce qui est l'occasion de commander les produits dont la quantité en stock est inférieure au stock de sécurité. La majorité des commandes se fait toutefois au fil de l'eau, les préparateurs remarquant un trop faible niveau de stock lors de l'approvisionnement de la salle de l'isolateur.

La mise à jour du stock virtuel est légèrement décalée par rapport à l'utilisation réelle des produits car les préparateurs recensent les flacons vides le soir. L'information est inscrite sur une fiche, donnée au comptable pour saisie informatique. Il se trouve toutefois que "à chaque inventaire, on observe une ou deux erreurs" [Collomp 2009]. L'utilisation de technologies d'auto-identification permet de réduire le temps et les ressources nécessaires à la gestion du stock et de l'approvisionnement, apports d'autant plus importants que le fonctionnement du service au début du projet n'inclut pas l'utilisation des codes barres. La quantification de ces bénéfices génériques aurait dû être effectuée dans le cadre du projet-pilote MISTRALS.

#### 4.1.1.2 Prescriptions - Logiciel CHIMIO

La gestion des prescriptions est faite au travers du logiciel CHIMIO. Ce logiciel en réseau permet aux différents utilisateurs (médecin, médecins juniors, pharmaciens-ennes, infirmières ...) d'avoir accès à différentes fonctionnalités. L'accès est restreint aux informations des patients et aux spécialités du service de l'utilisateur uniquement, sauf pour les pharmaciens qui ont accès à tout.

Suite aux examens médicaux, les médecins prescrivent un protocole de traitement, c'est-à-dire un ensemble de Dénominations Communes Internationales (DCI, c'est à dire le nom non commercial de substances -molécules- actives) à administrer à des dates définies. En 2009, la base de données CHIMIO du CHU de Nice contenait 507 protocoles validés, et une centaine non validés.

Les protocoles peuvent être paramétrés. Le logiciel CHIMIO peut contenir des limites au paramétrage suivant le protocole, et indique les valeurs recommandées. Les critères éditables par le médecin sont :

- Le nombre de cycles. Un nombre sera conseillé par le logiciel, un nombre maximal ne peut être dépassé ;
- Les solvants qui peuvent être choisis ;
- Les dosages sont modifiables dans la limite de plus ou moins 10%. Les dosages se font suivant la surface corporelle (revêtement cutané), c'est à dire une fonction dépendant de la taille et du poids du patient ;
- Il est possible de retirer 1 DCI.

Le médecin prescrivait doit donner une raison à ses choix, et plus particulièrement s'il désire ajuster des doses en dehors des seuils prévus et retirer une DCI d'un produit.

La validation pharmaceutique est effectuée par un pharmacien, qui vérifie la prescription et rectifie, en accord avec le médecin, d'éventuelles anomalies, que ce soit au niveau du dosage ou du protocole, "une erreur de clic peut très bien arriver" [Mirfenderski 2009]. L'erreur peut par exemple concerner la sélection du patient. Déceler cette erreur est d'autant plus difficile que le patient sélectionné à tort sera forcément du même service.

La prescription pourra ensuite être modifiée et adaptée en fonction de la réaction du patient aux précédentes étapes du protocole, mais aussi éventuellement de ses disponibilités.

Les prescriptions connaissent trois états principaux :

État prévu : le médecin annonce l'occurrence d'une cure dans X semaines ;

État prescrit : Le médecin reçoit le patient et fait d'éventuelles modifications sur le protocole initialement prévu ;

État demandé : Peu de temps avant la préparation, le médecin ré-ausculte le patient pour s'assurer que la prescription est toujours appropriée et valide la demande de production, cette validation a pour dénomination le terme "OK Chimio".

Des aléas impliquent des modifications lors des étapes menant à la préparation d'un produit chimiothérapique. La date d'administration de la médication est modifiée une fois sur deux après l'étape "état prévu".

Parfois, le OK Chimio est effectué pour le mauvais patient, c'est notamment le cas lorsque le médecin a anticipé la validation du protocole mais que le patient est absent. C'est le cas environ deux fois par semaines, avec une certaine périodicité. L'anticipation des OK Chimio est due au fait que certains protocoles s'étendent sur plusieurs jours, le OK Chimio donné le jour 1 peut impliquer la validation d'ordre de fabrication pour les jours 2 à 4.

L'outil CHIMIO est très utilisé dans des services similaires. Le projet MISTRALS prévoyait d'interfacer ce logiciel avec la base de données dédiée à la gestion automatisée des stocks. Cette interface aurait notamment permis de mieux gérer les commandes et d'avertir au plus tôt le cas où un produit viendrait à manquer.

#### 4.1.1.3 Préparations

Du fait de l'extrême toxicité des produits, et de la nécessité de les avoir 'propres', les manipulations ont lieu dans un isolateur, qui se trouve dans la salle de l'isolateur. L'entrée des produits dans cet isolateur se fait au travers de l'un des quatre SAS de stérilisation à l'acide peracétique. La durée de stérilisation est d'environ 12 à 15 minutes, des chariots adaptés permettent le chargement du matériel nécessaire à la réalisation de plusieurs ordres de fabrication.

La sortie des chariots peut s'effectuer par les mêmes SAS, où un rinçage à l'isoneutre d'une durée d'environ 3 minutes a alors lieu. L'isolateur est stérilisé une fois par mois.

La salle de l'isolateur est elle-même une "zone propre", c'est à dire qu'on ne doit pas y accéder sans s'être au préalable équipé d'une charlotte, de surchausses, gants et d'une combinaison prévue à cet effet. Le SAS de stérilisation du personnel (4.3) est prévue à cet effet. On remarquera que la majorité du stock est située à l'extérieur de la salle de l'isolateur, et qu'il est donc important de ne pas oublier de produits pour les heures à venir afin de limiter le nombre d'aller-retour en dehors de la salle propre. Un SAS et un interphone permettent aux préparateurs de communiquer et échanger les fiches de préparation avec le "Bureau des pharmaciens". Une prescription correspond à un ensemble de DCIs, avec leurs dosages et dates d'injection souhaitées, de même que pour leurs adjuvants. Une fiche de préparation doit être émise pour chaque DCI.

Trois postes constituent l'activité principale de préparation des produits, qui a lieu dans la salle de l'isolateur. La configuration du personnel la plus fréquente utilise 1 ressource au "passage", 1 à l'"emballage" et 3 manipulateurs à l'isolateur. Le fonctionnement idéal de l'isolateur nécessite 4 ressources, qui ne sont que rarement disponibles.

**Fiche de poste "Passage" :** Le préparateur attribué à ce poste a souvent beaucoup d'expérience, son rôle étant d'alimenter l'isolateur. Ses attributions sont de réceptionner les fiches de préparation, créer les fiches de liaison, qui suivront le produit et contiennent les indications de conservation ; de réaliser la collecte des produits initiaux et de remplir le chariot de préparations dans l'isolateur. Il gère la priorité des fabrications, dont certaines devront être réalisées en urgence. Il doit également comptabiliser les produits utilisés pour faciliter la gestion des stocks.

**Fiche de poste "Préparateur" :** La reconstitution est le fait de diluer un lyophilisat. L'utilisation de lyophilisats est parfois nécessaire pour assurer la stabilité de la solution. On doit parfois choisir entre différentes dimensions de flacon (solutions) et poudres (lyophilisats) ; ce choix impacte le coût des matières, qui diminue légèrement avec l'augmentation de la quantité. Les reliquats n'étant pas conservés d'un jour à l'autre, les gérants préfèrent être prudents en utilisant des flacons de volume adéquat.

La dilution est le fait de mélanger des produits entre eux, le choix des diluants pouvant varier suivant le patient et le protocole et les volumes devant respecter les dosages prescrits.

La préparation d'une poche d'injectable peut inclure les deux étapes de reconstitution et de dilution. On ne mélange pas les produits entre eux à Nice, chaque DCI est donc conservée puis transportée dans un sous-emballage de l'ensemble de la prescription, puis injectée individuellement. Le regroupement des DCI d'une prescription dans une même poche d'injection est toutefois pratiqué dans d'autres centres.

Afin de limiter le risque d'erreurs de dosage et de mauvais choix du produit, la double vérification est systématiquement utilisée, le risque portant surtout sur la présence de reliquats dans l'isolateur.

Certaines préparations, des reconstitutions notamment, ont un mode opératoire particulier (elles doivent être agitées pour limiter les précipités, nécessitent plusieurs étapes à

cause de la mousse ...). Les préparateurs peuvent avoir plus ou moins de facilité à réaliser certains types de préparations, à cause de ces particularités ou des contenants plus ou moins facilement maniables.

Il est possible d'effectuer certaines préparations, les moins toxiques, sous une hotte. Le centre dispose d'une hotte, utilisée occasionnellement pour la préparation de certains essais cliniques et en cas de panne de l'isolateur. Le manque de ressources humaines est un facteur bloquant pour utiliser cette ressource au mieux.

La section 4.3 suggère plusieurs pistes d'amélioration de la qualité et de l'efficacité des préparateurs.

**Fiche de poste "Emballage" :** Les tâches à accomplir à ce poste sont premièrement de réceptionner les préparations à la sortie de l'isolateur et de vérifier que les préparations sont conformes (en quantité et étiquetage) avec les fiches de préparation. Un emballer ayant une bonne connaissance des produits pourra également observer certaines anomalies comme la couleur d'un produit. L'emballage à proprement parler a lieu sur le plan de travail "Vérification et conditionnement des préparations". Il s'agit de remplir les sachets de livraison avec les adjuvants et les produits préparés, et les fiches de liaison (qui reviendront signées, accusant bonne réception). Notons que les adjuvants (anti-nauséeux, hydratants ...) sont préparés "en gros" (make to stock) et conservés dans la salle de l'isolateur, au niveau du poste d'emballage. Ils seront inclus aux sachets envoyés avec les DCI demandés. Les produits de rinçage ne sont quant à eux pas gérés par la pharmacie, ni mis dans les sachets de livraison. Ils sont directement commandés par les services où l'administration aura lieu. Si l'ensemble des produits était doté d'étiquettes intelligentes, la vérification du contenu des sachets pourrait être automatisée grâce à l'utilisation d'un lecteur positionné sous le plateau d'emballage.

Une donnée importante concerne la durée de vie des produits finis. La stabilité des produits est de 7 jours pour la majorité des produits. Quelques produits ont une durée de vie de 3 heures à 1 jour. Les autres produits ont une durée de vie variable (4j, 20j, ...), jusqu'à un maximum de 1 mois pour quelques exceptions.

##### 4.1.1.4 Transport

Trois à quatre manutentionnaires sont présents, suivant les jours. L'un d'eux est affecté à effectuer les livraisons des poches de produits prêts à administrer aux différents services, environ toutes les demi-heures.

Les préparations ne sont actuellement que marginalement envoyées à des services hors de l'hôpital Archet. Il n'y a pas de véhicules spéciaux pour les produits réfrigérés (ni initiaux ni finaux), l'utilisation de glacières est suffisant dans le fonctionnement actuel. Il pourrait devenir nécessaire d'utiliser des conteneurs réfrigérés, ou du moins de mesurer la température des produits durant le transit dans le cas de tournées de livraison à différents sites d'administration (maisons d'infirmières, traitements à domicile ou hôpitaux environnants).

Il est possible de ne tagger que les contenants des produits prêts à être administrés, ce qui pourrait par ailleurs être effectué sans changer les processus actuels si la puce est intégrée aux imprimés à coller sur les poches des produits finis. L'éventualité d'un capteur, thermique par exemple, semble inaccessible mais l'écriture des températures de conservation sur les puces des



produits est envisageable.

#### 4.1.1.5 Administration

Un intérêt de l'apposition d'étiquettes intelligentes au niveau des produits finis est de permettre une automatisation de la traçabilité concernant le produit, le patient et le traitant. Certaines médications nécessitent l'administration préalable d'autres produits destinés à améliorer l'acceptation du cytotoxique par le patient ; la traçabilité de la prise de chacun des produits peut permettre de vérifier le respect des posologies et des horaires de dispensation. On peut également imaginer une communication entre d'éventuels appareils de contrôle de l'injection des produits, qui doit respecter certaines contraintes, propres au patient.

#### 4.1.1.6 Traitement des déchets

Les déchets toxiques doivent suivre un parcours particulier, et les gérants doivent pouvoir justifier de sa tenue. Le projet MISTRALS prévoyait d'agrémenter l'isolateur d'une poubelle lisant les étiquettes des flacons jetés à la volée. Un local est dédié à ces produits avant qu'ils ne soient expédiés à un centre d'incinération ; il est question d'apposer une étiquette intelligente sur les sacs en plastique spéciaux afin que leur traçabilité soit automatiquement effectuée jusqu'à leur chargement dans le transporteur et éventuellement à la réception au centre de valorisation des déchets.

Le projet PAC-Id DASRI [Collomp et al. 2010], auquel nous avons participé, concerne la prise en compte des déchets piquants, coupants et tranchants issus des traitements aux particuliers. Des boîtes sont spécialement prévues pour collecter ces déchets dans le cadre des auto-traitements et des traitements à domicile. Ce projet vise à valider la faisabilité de tracer les boîtes à DASRI par l'utilisation de technologies RFID HF, et à mener une étude sociologique de la perception et des difficultés d'implémentation de ces technologies. Il a abouti à la création de prototypes de collecteurs automatisés pour les pharmacies (pharmacollects), et à l'intégration de lecteurs RFID au niveau des conteneurs dédiés, principalement destinés aux médecins. Le travail de Ajili [2010], qui a effectué son stage de Master à l'École des Mines et que nous ne détaillerons pas ici, a consisté en une étude préliminaire de l'utilisation de l'information en temps réel dans le but d'améliorer la collecte des DASRI en officines.

### 4.1.2 Conclusions

Le projet MISTRALS n'aboutira finalement pas à la mise en place du pilote PHARMA malgré un énorme travail de la part des membres du CHU de Nice qui ont précisément décrit le fonctionnement de leur service et les détails d'une utilisation des RFID leur paraissant bénéfique dans un cahier des charges détaillé [Collomp et al. 2007]. Il existe de nombreuses pistes d'amélioration du fonctionnement des services de pharmacotechnie, ne nécessitant pas forcément l'utilisation de technologies auto-communicantes. Les difficultés de financement et

---

DASRI : Déchets d'Activité de Soins à Risque Infectieux, voir le site web du projet : <http://www.pac-id-dasri.eu/>

les stratégies adoptées peuvent aboutir à des aberrations comme le fait de refuser le financement d'une alarme déclenchée par la température d'un réfrigérateur, qui a abouti à la perte de l'ensemble des produits qu'il contenait suite à une panne électrique.

Les sections suivantes se concentrent sur des points particuliers de l'utilisation de technologies RFID dans la production de cytotoxiques. La première étude adopte une approche macroscopique, et considère une augmentation du besoin en parallèle à une éventuelle mutualisation du service, nécessitant donc le transport des produits finis. La seconde est focalisée sur la préparation des poches de produits, et propose d'étudier les impacts de l'utilisation d'un système de détrompeurs et de traçabilité pour adopter une approche d'ordonnancement qui maximise la formation des préparateurs aux différents types de manipulations nécessaires.



## 4.2 Etude macroscopique : Logistique de la production de chimiothérapies

Cette section résume le stage effectué par [El Yousfi \[2010\]](#). Outre un travail bibliographique abordant un ensemble de sujets (les médicaments anticancéreux, la sécurité des personnes, la traçabilité et l'organisation hospitalière), le logiciel de simulation à événements discrets Arena a été utilisé pour réaliser des comparaisons entre différents scénarios d'intégration des technologies sans contact. Le modèle implémenté est en grande partie configurable et permet de simuler de nombreux scénarios de fonctionnement. Le diagramme présenté par la figure 4.4 décrit le modèle réalisé pour cette étude. Les arrivées sont des fiches de fabrication, qui sont générées au travers d'une loi de probabilité de Poisson et dont les paramètres sont affectés suivant une loi uniforme.

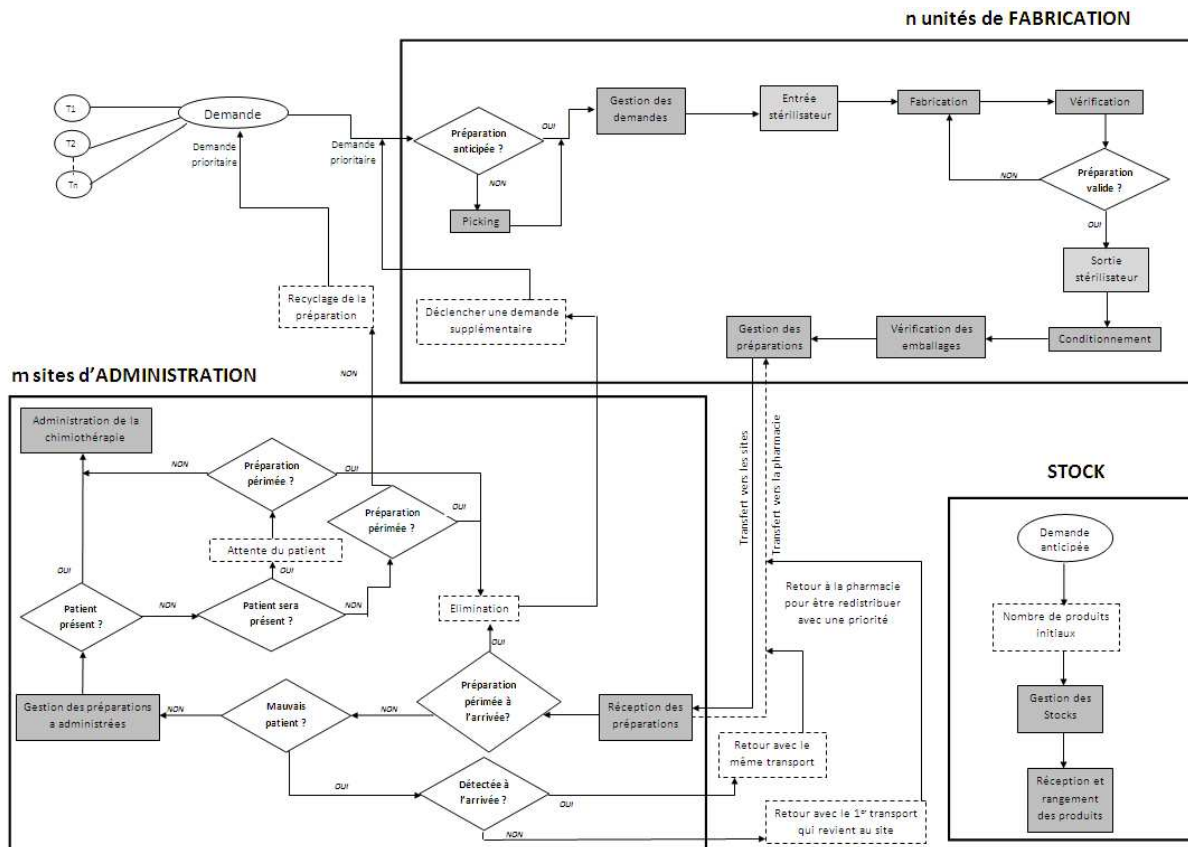


FIGURE 4.4 – Diagramme des processus de chimiothérapie [[El Yousfi 2010](#)]

Les paramètres du modèle et scénarios étudié prend également en compte l'intégration de la technologie dans le cadre de la production et l'acheminement des produits chimiothérapiques jusqu'au lieu de dispensation, séparant le cas de leur utilisation au niveau des produits initiaux et des produits finis. L'utilisation des technologies au niveau des produits initiaux impactera principalement les processus de gestion du stock et de préparation. Les processus d'acheminement et d'administration au patient sont uniquement impactés par l'utilisation des technologies

au niveau des produits finis. Il est possible de modifier le nombre de ressources machine disponibles (capacité de l'isolateur), ainsi que le nombre de services de dispensation à alimenter et leur distance.

##### 4.2.1 Expériences réalisées

Dans cette étude, l'utilisation des technologies modifie principalement les temps de processing, d'un certain pourcentage du temps initial, qui peut être différent pour chacun des processus. Les probabilités d'erreurs sont également réduites lors de la mise en place de ces technologies.

Des scénarios de mise en place de mutualisation de la pharmacie, incluant plusieurs politiques de tournées de livraison, ont été observés. Les livraisons peuvent être effectuées par l'intermédiaire d'un moyen de transport pour chaque unité d'administration, d'un moyen de transport pour chacune ou de plusieurs moyens de transport se répartissant les livraisons à effectuer. Le processus d'administration peut ne pas avoir lieu immédiatement, à cause de l'absence du patient, du fait que la préparation a été livrée au mauvais service et qu'elle s'avère périmée lors de son arrivée au bon service. Sont également pris en compte l'accroissement de l'activité dû au vieillissement de la population, à l'augmentation du nombre de malades atteints du cancer, ainsi qu'aux politiques de dépistage menées.

Ainsi, quatre scénarios technologiques ont été retenus : le fonctionnement actuel, sans technologies ; l'intégration des RFID au niveau des stocks et de la fabrication ; leur inclusion aux poches de préparation et pour l'administration ; et leur utilisation dans l'ensemble des processus. Ces quatre scénarios sont agrémentés de plusieurs niveaux d'augmentation du besoin (10% et 15%), de l'addition d'au moins un site d'administration et de trois politiques de transfert des préparations.

##### 4.2.2 Indicateurs de performance

Les indicateurs de performance retenus concernent principalement les temps de passage aux différentes étapes et les taux d'utilisation des ressources. Ils correspondent respectivement à un certain niveau de "satisfaction du patient", qui peut être fort impactée par l'occurrence d'erreurs et la disponibilité des ressources, et au taux d'utilisation des ressources.

Les ressources humaines prises en compte sont les préparateurs, sous isolateur et pour la gestion du stock ; les livreurs et les infirmiers accusant réception des préparations pour les administrer aux patients. Cette dernière étape n'est pas précisément prise en compte, le champ de la simulation s'arrête à l'orée de l'administration au patient. Les machines intégrées au modèle sont l'isolateur et la hotte, à laquelle ne peuvent être affectés que certains types de préparations. Le taux d'utilisation de ces ressources pourra être mis en relation avec le taux d'utilisation des ressources humaines. Le nombre de préparations n'ayant pas suivi le cycle "normal" est également décompté. Il est considéré ici qu'une infime minorité des préparations non périmées sont réutilisables, et que leur réutilisation est effectuée en priorité.

Tableau 4.1 – Taux d'utilisation des ressources à l'isolateur suivant le scénario technologique

	Sans RFID	RFID Produit	RFID Préparation	RFID système
Capacité humaine = 3	49%	37.67%	45.33%	37.67%
Capacité humaine = 4	36.75%	28.25%	34%	28.25%

### 4.2.3 Quelques résultats

Nous présentons ici une sélection de quelques résultats produits par El Yousfi [2010]. Le tableau 4.1 contient les résultats concernant les taux d'utilisation des ressources humaines mis en relation avec les différents scénarios d'implémentation des RFID. Il est intéressant de remarquer que, considérant les hypothèses émises, la capacité de production sera plus grande si l'on ajoute une ressource au niveau de l'isolateur que si l'on utilise des RFID dans le système. Cette interprétation suppose évidemment que l'isolateur sera bien alimenté et que l'augmentation de la capacité de production ne déplace pas le goulet d'étranglement à un autre niveau de la chaîne. D'autres résultats laissent supposer que les ressources infirmières pourraient venir à manquer si la productivité est trop importante et que des produits livrés ne pourront être administrés qu'après un temps d'attente comparable au délai inter-livraison.

D'autres résultats montrent que l'affectation d'un livreur par pharmacie n'apporte pas d'avantages significatifs, que la délocalisation de la pharmacie au nouvel établissement n'est pas intéressante sans une importante relocalisation des sites d'administration, ou encore que l'utilisation des RFID peut permettre d'absorber l'impact d'une augmentation de la demande sans avoir besoin d'ajouter d'autres ressources que les infirmiers traitants.

### 4.2.4 Conclusion

Les résultats présentés ici montrent bien que l'ensemble des alternatives se présentant aux décideurs hospitaliers rendent extrêmement complexe la décision d'adopter les technologies RFID. Ces technologies sont en effet très contraignantes à intégrer aux systèmes d'information existants pour en tirer un bénéfice optimal. Il est de plus difficile de généraliser les apports dus à leur implémentation car ceux-ci dépendent grandement du système ciblé. Cette étude met en relation l'intérêt des RFID avec la mutualisation d'une pharmacie et son éventuel déplacement. Les résultats montrent que les apports des technologies dépendent de la configuration organisationnelle choisie. L'impact de l'ensemble {technologies, organisation} pourra dépendre des paramètres physique du centre étudié.

Ces observations nous portent à rappeler l'importance que peut avoir un outil de simulation dans l'aide à la décision. Il est regrettable que l'expérimentation MISTRALS Pharma n'ait pas pu être réalisée car les retours d'expérience auraient permis de mieux configurer les apports dus à l'utilisation des technologies aux différentes étapes du circuit des chimiothérapies et suivant les outils mis en place.

## 4.3 Production de solutions chimiothérapiques

Cette section traite un aspect particulier de l'introduction de technologies auto-communicantes dans un système de production de solutions injectables. L'utilisation de données précises relevées automatiquement peut permettre d'estimer des paramètres propres à chaque manipulateur. Nous proposons d'utiliser ces informations afin de produire un ordonnancement et une affectation des tâches aux employés qui intègre une notion de formation continue. La prise en compte de l'évolution des compétences individuelles dans la mesure de la performance d'un système de production est adaptée aux problèmes actuels que posent la mutualisation des moyens et la raréfaction de personnel.

La première partie de cette section décrit le système considéré pour cette étude prospective. Nous proposons ensuite une description du problème d'ordonnancement et les approches de résolution retenues. Le modèle de simulation à événements discrets est ensuite présenté (section 4.3.3). La section 4.3.4 décrit les expériences et résultats.

### 4.3.1 Objectifs et méthode

Une importante part de la valeur ajoutée de ce type d'ordonnancement réside en la robustesse, à long terme, du système face à des aléas tels qu'un soudain accroissement d'une activité et/ou l'indisponibilité du personnel. La réduction de l'impact d'absences peut être effectuée au travers de la formation d'un maximum de personnel aux diverses manipulations nécessaires à la préparation d'injectables. Nous présentons donc un outil d'affectation des tâches aux ressources qui vise à optimiser et maintenir la formation continue des ressources humaines en ne dégradant la qualité de service que dans des proportions acceptables par les responsables du centre de pharmacotechnique.

#### 4.3.1.1 Considération matérielle : Des détrompeurs infaillibles

Nous considérons que le principe de reconnaissance automatique des erreurs est assez efficace et performant pour que la qualité des poches produites soit toujours acceptable lors de leur sortie de l'isolateur. Pour s'assurer que la qualité du médicament produit est bonne, deux manières principales peuvent être retenues. La première consiste en l'analyse d'un échantillon associé à chaque poche, comme décrit dans [Bazin et al. 2010] pour les préparations à base d'anticorps monoclonaux. Les quantités de produits utilisés pour les préparations peuvent également être vérifiées en temps réel, afin de détecter toute erreur de dosage avant que la poche ne soit sortie de l'isolateur. Cette opération peut être envisagée de plusieurs façons : en couplant le sous système de vérification des produits utilisés à la configuration automatique de pipettes électroniques ou en proposant un ensemble de socles intelligents pesant les flacons de produits initiaux à chacune de leur utilisation [Cato 2010]. L'efficacité d'un tel système est avancée dans des documents tels que [Grouzmann et al. 2006] ou [Bonnabry 2010b]. Ainsi, on peut considérer que toute erreur de manipulation sera reconnue et qu'elle mènera "seulement" à une perte de temps, et éventuellement de produits initiaux.

#### 4.3.1.2 Mesure de la performance des manipulateurs

La solution RFID envisagée en amont de cette étude est similaire à celle décrite par [Wessel \[2007\]](#), ou sur le site de la société [Progress \[2008\]](#). Le dispositif permet notamment, au travers des bagues, de savoir quel employé a effectué quelle tâche (nous nous focaliserons ici sur les préparations) et en combien de temps. Des travaux comme [\[Buettner et al. 2009\]](#) ou [\[Stikic et al. 2009\]](#) observent que la reconnaissance de l'activité, basée notamment sur l'utilisation de données issues de capteurs RFID, peut être de bonne qualité sans forcément nécessiter de longues séances d'apprentissage. D'autres technologies de reconnaissance, comme l'utilisation d'images notamment, provenant de l'intelligence ambiante, ainsi que d'autres types de capteurs communicants (micros, infrarouge, ...) [\[Kubota 2007\]](#) peuvent permettre de les rendre plus fiables. [\[Chan et al. 2009\]](#) contient de bons exemples de systèmes d'intelligence ambiante qui peuvent compléter ces systèmes de reconnaissance de l'activité humaine.

Grâce à ces données, en plus de facilement enregistrer les informations de traçabilité réglementaires, une partie du programme informatique essaiera de déterminer le profil des manipulateurs.

L'outil décisionnel et les données qu'il utilise pourront être regroupés en "boîte noire", afin de ne pas risquer d'attenter à la privauté de chacun. On pourra toutefois imaginer que les employés aient accès, en consultation tout au moins, à leurs informations personnelles. L'un des avantages recherchés étant un accroissement de la motivation et une forme de reconnaissance automatisée, renforcée par le fait que les données ne mentent pas pour faire plaisir. On peut penser que cette solution permettrait d'améliorer la motivation des manipulateurs au travers du suivi de l'évolution de leurs compétences propres. [\[Osmani et al. 2008\]](#) montre notamment que la reconnaissance de l'activité peut mener à une forme de collaboration efficiente, conduisant à une nette augmentation de la productivité.

Partant du fait que l'on utilise l'un de ces ensembles technologiques, nous avons défini un programme d'ordonnancement incluant l'affectation des ressources qui vise à maximiser le niveau de formation des employés, et qui considère que des manipulateurs sans aucune expérience peuvent effectuer des préparations de cytotoxiques. Cet ordonnancement aura pour effet de réduire la productivité du système, c'est pourquoi il sera nécessaire d'y affecter une limite de dégradation de la qualité de service, qui devra être décidée par les responsables du service. La section suivante décrit plus précisément ce problème d'ordonnancement et l'approche retenue pour sa résolution.

#### 4.3.2 Ordonnancement

Cette section utilise le formalisme défini par [Graham et al. \[1979\]](#). Les tâches à effectuer ne sont pas toutes identiques, le temps de préparation est donc dépendant de la prescription, que l'acquisition d'une certaine technique et habitude peut diminuer.

[Mazier et al. \[2010\]](#) proposent une méthode réactive utilisant la programmation linéaire en nombres entiers pour déterminer un ordonnancement minimisant la somme des retards et le retard maximum. Le modèle proposé considère que tous les postes de production sont équivalents (machines parallèles). La méthode consiste en l'élaboration d'une solution à partir des injections prévues, puis un traitement réactif de cette solution au cours de la journée, suivant les

arrivées des ordres de validation des préparations ("OK Chimio"). La sélection des lots pour la stérilisation est négligée par l'algorithme ; elle est dans notre cas effectuée par la ressource au poste du "passage" suivant l'ordonnancement prévu. Les tâches composant les lots sont alors affectées aux lignes de production, qui sont supposées équivalentes dans l'étude de [Mazier et al. \[2010\]](#). Notre étude considère que les lignes de production ont une performance propre.

[Kergosien et al. \[2010\]](#) décrivent un système complet de planification et traçabilité de la production de chimiothérapies. Le système décrit contient un module logiciel, "Planif.", qui résout le problème d'ordonnancement sur machines parallèles non uniformes  $Q_2|r_i, d_i, available|L_{max}$ . Les solutions optimales sont trouvées en utilisant la programmation par contraintes sur les instances de petite taille traitées.

Notre approche considère que chaque ensemble {Type de préparation, Manipulateur} a un coefficient de performance propre. Cette description vient des possibles particularités de préparation (précipités, mousse, ...) apparaissant notamment lors de la reconstitution des injectables. Pour ce faire, des ensembles de manipulations ont été créés suivant la difficulté de la préparation. Les préparateurs acquièrent donc de l'expérience pour un type de produit particulier. Ils seront donc représentés comme  $m$  machines indépendantes ( $R_m$ ).

Dans le but de prendre en compte les deux objectifs, plusieurs formats de réponse sont envisageables. Une possibilité consisterait en l'ensemble de solutions Pareto-optimales, le point retenu sera dans ce cas à discrétion du décideur. Les expérimentations décrites en fin de chapitre permettront de donner une vision quant à la dégradation de la qualité de service due à l'utilisation d'un ordonnancement visant à améliorer et maintenir le niveau de performance des manipulateurs. Afin de mesurer la qualité de service du système, nous proposons d'utiliser des dates limites (deadlines) ; terminer une tâche après ces dates dégrade fortement la qualité de service. Ces dates sont évidemment supérieures aux dates échues (due dates).

Comme nous l'avons vu dans la partie 2.1, une grande importance doit être portée au facteur de risque dans l'évaluation de la performance des systèmes hospitaliers. Les temps de production relatifs {type de préparation, manipulateur} variant dans le temps, un indicateur de performance prenant en compte un facteur de risque d'absences pousserait par exemple à faire préparer des produits 'difficiles' aux manipulateurs junior lorsque les journées ne sont pas des plus chargées. La difficulté sera alors de pondérer cet indicateur de gestion des compétences par rapport à la qualité de service (prise en compte des retards de livraison aux services d'administration). A ces temps de manipulation on peut associer un risque de mauvaise manipulation, qui aura pour conséquence soit la perte de la poche de production en cours, soit, si l'incident n'a pas été relevé, au transfert vers le lit du patient d'une solution dangereuse. Si l'infirmière en charge d'administrer la préparation au patient ne peut pas observer que la préparation a été mal préparée la conséquence pourrait être l'injection d'une solution dangereuse pour le patient.

[Hlaouittinun et al. \[2009\]](#) classent les problèmes d'affectation des ressources humaines en 4 catégories. Les critères étant "mono périodes" et "multi périodes", à "compétences statiques" ou "compétences dynamiques". Le travail présenté ici considère de multiples périodes de travail, et une évolution dynamique des compétences.

[Biskup \[1999\]](#) est parmi les premiers à étudier les effets de l'apprentissage dans l'ordonnancement. Dans un état de l'art des méthodes d'ordonnements intégrant des effets de l'apprentissage, [Biskup \[2008\]](#) rappelle que ce type d'approches doit être utilisé lorsque l'activité humaine a une grande importance, notamment dans le cas où de nombreuses interventions ma-



nuelles sont nécessaires (ce qui est notre cas). Cet état de l'art ne contient pas de cas de problèmes identiques au nôtre.

Mosheiov and Sidney [2003] proposent une approche d'ordonnancement pour minimiser le temps de travail total dans le cas de machines indépendantes en un temps polynomial. Mönch [2008] et Shim and Kim [2007] utilisent respectivement une heuristique de "colonies de fourmis" et un branch-and-bound pour résoudre  $R_m || \sum w_j T_j$ , c'est à dire la minimisation de la somme des retards pondérés dans un problème à machines indépendantes. Ces problèmes sont NP-difficiles au sens fort, par extension de  $1 || \sum w_j T_j$  [Lawler 1977]. Très récemment, Lin et al. [2011] comparent des heuristiques ayant divers objectifs pour l'ordonnancement sur machines indépendantes. Nous n'avons pas trouvé dans la littérature de démonstrations du fait que  $R_m || \sum T_j$  est NP-difficile, mais  $1 || \sum T_j$  est NP-difficile au sens faible, puisqu'il existe un algorithme pseudo-polynomial pour le résoudre [Lawler 1977]. Sitters [2001] montre que le problème  $R_m || \sum U_i$  est NP-difficile au sens fort. Nous pouvons déduire de ces deux dernières affirmations que notre problème est NP-difficile au sens fort. Le résoudre à l'aide de méthodes exactes pourra donc nécessiter un temps de calcul considérable qui augmentera exponentiellement avec la taille des instances à résoudre.

Le problème que nous cherchons à résoudre est un problème d'ordonnancement sur machines indépendantes à objectif ambivalent. On cherche en effet à minimiser les retards (auxquels on pourra ultérieurement affecter un poids), en respectant si possible une certaine limite (deadline), et en maximisant le temps de production, qui est (par simplification) relatif à l'évolution des compétences. Nous proposons de définir notre problème comme suit :  $R_m | r_i, d_i, \tilde{d}_i, LE | Min(F)$ , où  $F$  est la fonction objectif, l'acronyme "LE" représentant l'effet d'apprentissage, tel que défini par Mosheiov and Sidney [2003].

Nous pouvons considérer que l'évolution des compétences n'a pas d'impacts sur l'horizon de l'ordonnancement, des aléas pouvant fréquemment remettre en cause les  $r_i$  (et par conséquent  $d_i$  et  $\tilde{d}_i$ ) au cours de la journée.

Nous résoudrons le problème en considérant que la fonction objectif,  $F$ , est une combinaison hiérarchique d'objectifs. L'objectif le plus important consiste en la somme du nombre de tâches en retard par rapport aux *deadlines* ( $\sum U_j$ ). Ce premier objectif domine la somme des retards (total tardiness,  $\sum T_j$ ), il est donc factorisé par un *Big M*, qui pourra être fixé à une grande valeur ou calculé en fonction de chaque instance. La somme de ces deux mesures compose une première fonction objectif qui vise à maximiser la qualité de service. Un premier ordonnancement peut donc être calculé en utilisant cette fonction.

Dans un second temps, nous chercherons à maximiser le temps total relatif de production, corrélé à l'apprentissage car inversement proportionnel au niveau d'expérience des manipulateurs. Si on cherche à prendre en compte chaque manipulateur individuellement, il est nécessaire de comparer leur potentiel d'apprentissage maximal avec leur niveau actuel pour chaque type de produit qui leur est affecté. Si on considère que les manipulateurs ont la même capacité d'apprentissage, on peut réduire cet indicateur au temps total de production, que l'on cherchera à maximiser. Cette seconde étape devra être effectuée en respectant une qualité de service donnée, en intégrant le résultat de la première partie de l'algorithme aux contraintes. Il est envisageable de dégrader ce résultat volontairement afin d'augmenter les possibilités d'affectation des tâches

aux manipulateurs les moins expérimentés. Des tests effectués dans ce sens sont décrits dans la section 4.3.4.5.2.

La section suivante présente un PLNE qui cherche à résoudre  $R_m|r_i, d_i, \tilde{d}_i|Min(F)$ , c'est à dire la première partie de l'ordonnancement. Nous présentons ensuite une heuristique de type Tabou qui résout les deux parties du problème. Nous comparerons par la suite la première partie de cette heuristique avec les résultats obtenus en résolvant le problème en utilisant le solveur commercial CPLEX.

#### 4.3.2.1 Modélisation PLNE

Nous avons utilisé un modèle utilisant des variables indexées dans le temps afin de résoudre le problème  $R_m|r_i, d_i, \tilde{d}_i|(F_1^a = \sum T_j + M \sum \tilde{U}_j)$  décrit dans la partie précédente. Le modèle utilisé est le suivant :

##### Paramètres et notation :

- $n$  est le nombre de tâches à effectuer ;
- $\mathcal{N} = \{1, \dots, n\}$  ;
- $\mathcal{M}$  désigne l'ensemble des préparateurs hospitaliers ;
- $\mathcal{K}$  désigne l'ensemble des périodes ;
- $m$  est l'index d'un Préparateur Hospitalier ;
- $j$  est l'index d'une tâche ;
- $k$  est l'index d'une période ;
- $P_{mj}$  : Temps de préparation de la tâche  $j$ , si effectuée par le préparateur  $m$  ;
- $F$  : Temps de préparation maximal ;
- $r_j$  : Release date de la tâche  $j$  ;
- $D_j$  : Due date associée à la tâche  $j$  ;
- $\tilde{D}_j$  : Deadline associée à la tâche  $j$  ;

##### Variables :

- $B$  est la pénalité associée au dépassement d'une deadline ;
- $L_j$  : Retard estimé pour la tâche  $j$  ;
- $\tilde{L}_j = 1$  si la tâche  $j$  se termine après sa deadline, 0 sinon ;
- $X_{mjk} = 1$  si la ressource  $m$  commence à effectuer la tâche  $j$  à la période  $k$ , 0 sinon ;

##### Objectif :

$$\text{Minimize}(\sum_{j \in \mathcal{N}} (L_j + 10000 \times \tilde{L}_j));$$

##### Sujet à :



$$\sum_{m \in \mathcal{M}, k \in \mathcal{K}} X_{mjk} = 1, \quad \forall (j \in \mathcal{N}) \quad (4.1)$$

$$\sum_{m \in \mathcal{M}, k \in 1..r_j} X_{mjk} = 0, \quad \forall (j \in \mathcal{N}) \quad (4.2)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{N}} X_{mjk} \leq 1, \quad \forall (m \in \mathcal{M}, k \in \mathcal{K}) \quad (4.3)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{N}} \sum_{k \in t..t+P_{mj}} X_{mjk} \leq 1, \quad \forall (m \in \mathcal{M}, t \in 1..\mathcal{K} - F) \quad (4.4)$$

$$L_j \geq \sum_{m \in \mathcal{M}, k \in \mathcal{K}} X_{mjk} * (k + P_{mj} - D_j), \quad \forall (j \in \mathcal{N}) \quad (4.5)$$

$$L_j \leq \sum_{m \in \mathcal{M}, k \in \mathcal{K}} ((\tilde{D}_j - D_j) X_{mjk}) + B\tilde{L}_j, \quad \forall (j \in \mathcal{N}) \quad (4.6)$$

$$L_j \geq 0, \quad \forall (j \in \mathcal{N}) \quad (4.7)$$

$$\tilde{L}_j \in \{0, 1\}, \quad \forall (j \in \mathcal{N}) \quad (4.8)$$

$$X_{mjk} \in \{0, 1\}, \quad \forall (m \in \mathcal{M}, j \in \mathcal{N}, k \in \mathcal{K}) \quad (4.9)$$

La contrainte (4.1) impose que toutes les tâches soient effectuées une et une seule fois ; elles doivent démarrer après leur release date (4.2). Les contraintes (4.4) et (4.3) interdisent l'ubiquité des ressources (aux ressources d'être affectées à deux tâches à la fois). Les contraintes (4.5) et (4.6) permettent de calculer l'ensemble des retards, non négatifs. Les contraintes (4.7), (4.8) et (4.9) représentent le domaine de définition des variables de décision.

Nous avons voulu donner une grande importance à  $B$  en lui affectant une valeur égale à la somme des durées de manipulation d'une ressource. La valeur 10000, dans la fonction objectif, permettra de décomposer aisément les résultats obtenus. La qualité de résolution peut également dépendre de la valeur donnée au nombre d'unités de temps ( $K$ ). Il peut être intéressant de chercher à limiter cette valeur, par exemple en utilisant la somme des temps de production moyens par tâche ou une proportion de la somme totale de temps de production. Nous avons également expérimenté un modèle utilisant des variables de positions, que nous ne décrivons pas ici du fait de la mauvaise efficacité dont il a fait preuve sur nos instances.

#### 4.3.2.2 Résolution heuristique

Cette section décrit la résolution du problème basée sur une heuristique de type Tabou. On décompose cette description en 3 parties que sont la création d'une solution initiale, la minimisation des retards, puis l'augmentation du potentiel de gain de compétences.

La règle de classification des tâches utilisée dans les expérimentations considère d'abord la date de démarrage au plus tard (*lateStart*), prenant en compte la moyenne des compétences estimées des manipulateurs. En cas de *lateStart* identiques, le classement est effectué en comparant consécutivement : les due dates, la criticité, le temps absolu des manipulations nécessaires (ne prenant pas en compte les niveaux de compétence des manipulateurs) et les release dates, sélectionnés par ordre croissant. En cas de propriétés identiques, le classement est fait suivant le type des tâches et l'identifiant des tâches, par ordre croissant également.

L'amélioration de cette solution, au vue de la qualité de service immédiate, s'effectue en modifiant l'affectation des tâches. La création du voisinage cherche d'abord à déplacer chaque tâche, en l'insérant dans le planning des ressources. L'insertion s'effectuera dans ce cas à la première position juste avant la première tâche supérieure, au sens du classement décrit ci-dessus, à celle déplacée. L'amélioration de la solution essaie également d'échanger la position de chaque tâche avec celle de chaque tâche ayant un indice supérieur au sien.

Une première partie de l'amélioration de la solution vise à minimiser les retards, et une seconde phase cherche à améliorer l'acquisition de compétences par les manipulateurs.

Il est à noter que le temps de processing total est, dans le cas où les courbes d'évolution des performances des manipulateurs sont équivalentes, lié à l'acquisition des compétences. Le fait de ne pas pondérer l'indicateur de variation des compétences avec la capacité d'apprentissage des manipulateurs est une simplification due au fait que cette capacité est très difficile à estimer de manière fiable, à cause notamment des facteurs de dégradation de la performance.

1. Phase de construction d'une solution initiale :
  - Ordonner les tâches suivant une règle de classement choisie
  - Tant que les tâches ne sont pas toutes affectées
    - Sélectionner la prochaine tâche dans la liste des tâches ordonnées
    - L'affecter au poste permettant de la terminer le plus tôt
2. Phase d'amélioration 1 :
  - Créer une liste des paires de tâches échangeables, tâches dont les fenêtres de temps commune  $[\max(\text{release dates}) ; \min(\text{deadlines})]$  est supérieure au minimum des temps de production de ces tâches.
  - Mesurer l'impact d'un échange entre chaque paire de tâche échangeables (variation des retards et du temps de production), hors paires taboues.
  - Mesurer l'impact de réaffecter chaque tâche à chacun des manipulateurs, hors ensemble (tâche, manipulateur) tabou
  - Si la meilleure variation des retards est positive ou nulle, appliquer le voisin pour lequel la variation du temps de processing total est le plus grand
  - Sinon, appliquer le voisin pour lequel  $\frac{\delta_{\text{Temps de Processing}}}{\text{Retard}}$  est maximum.
3. Phase d'amélioration 2 :
  - Mesure de l'impact des réaffectations et échanges : En interdisant toute augmentation du retard, maximiser la variation des compétences au travers de l'augmentation de la somme des temps de manipulation.

**4.3.2.2.1 Aspect dynamique** Certains évènements peuvent pousser à relancer l'algorithme d'optimisation de l'ordonnancement en cours de réalisation : l'annulation d'un traitement, la commande en urgence d'un produit ou encore le fait d'observer qu'une durée de préparation a été mal estimée. L'amélioration des compétences des manipulateurs ainsi que l'approximation des compétences des manipulateurs peuvent également mener, au cours d'un même exercice, à une mauvaise évaluation des durées de préparations lui étant affectées. On aura notamment tendance à surévaluer les durées de production lorsque les manipulateurs ont peu d'expérience, puisque l'asymptote à leur courbe d'apprentissage a alors un coefficient directeur grand.

Lorsque le module d'ordonnancement rencontre l'une de ces situations, il effectue l'enchaînement des processus suivants :

- Créer une liste des tâches annexe ne contenant que les tâches non exécutées ou en cours d'exécution au moment de relancer l'algorithme ;
- Y ajouter les tâches en cours de réalisation et déjà effectuées, tronquées pour que leur durée corresponde à la durée de manipulations observée ou estimée restante pour les insérer à une liste de tâches non modifiables ;
- Mettre à jour les dates des tâches terminées et en cours de réalisation avec les dates estimées et observées, interdire la modification de ces tâches ;
- Décaler la release date de toutes les tâches qui ne sont pas dans l'isolateur d'un temps approximativement égale au temps nécessaire à la stérilisation des produits nécessaires. Nous avons simplifié cette étape en considérant que les trois tâches affectées à chaque manipulateur sont présentes dans le chariot d'alimentation de l'isolateur et donc disponibles immédiatement.
- Répéter les deux étapes successives de voisinage avec les nouveaux paramètres ;
- Renvoyer la dernière meilleure solution trouvée.

Si dans les deux cas la condition d'arrêt de l'exploration du voisinage est basée sur un temps de calcul, des durées différentes sont affectées à chaque étape du voisinage dans la génération d'une première solution et d'une modification de solution en cours de réalisation.

### 4.3.3 Évaluation du système

L'intérêt de l'observation du système par simulation est notamment d'évaluer la précision de la création des profils des manipulateurs par le système d'aide à la décision. Cette évaluation est faite en utilisant les données observées au travers des différents capteurs, à chaque fin d'exercice. Différents modes de mise à jour des profils des manipulateurs, au niveau de l'isolateur, devront être testés. Les objectifs de cette simulation posent la question d'utiliser une simulation orientée agents, dans laquelle chaque opérateur possède des attributs propres. Les objectifs de cette évaluation n'accordent pas une grande importance aux communications entre les protagonistes de la simulation, ni des décisions individuelles ; seulement des états impliquant des durées de manipulations et des probabilités d'erreurs (que nous considérons toutes captées par le système). Nous proposons donc une simulation orientée objets pour l'estimation de la performance du système.

L'impact de différentes stratégies et paramètres sera observé suivant le déroulement de scénarios prédéfinis. Les scénarios peuvent intégrer un aspect stochastique au niveau des temps de préparation.

La figure 4.5, décrit le fonctionnement désiré de la simulation. On observe dans ce diagramme la différence entre les profils "réels" et les profils "estimés" des manipulateurs. Les profils réels sont ceux qui sont utilisés par le moteur de simulation pour définir les temps de production et éventuellement les probabilités de mauvaise manipulation des préparateurs. Les profils estimés sont ceux qu'utilise l'ordonnanceur pour estimer les durées de production. L'adéquation entre les profils réel et estimé dépend de la fréquence de mise à jour des profils, de la précision des données utilisées et de la fonction utilisée pour le faire. Les probabilités d'erreur dépendent également du type de détrompeur utilisé. Nous supposons pour les réalisations que

les détrompeurs permettent d'éviter toute erreur de manipulation irrécupérable.

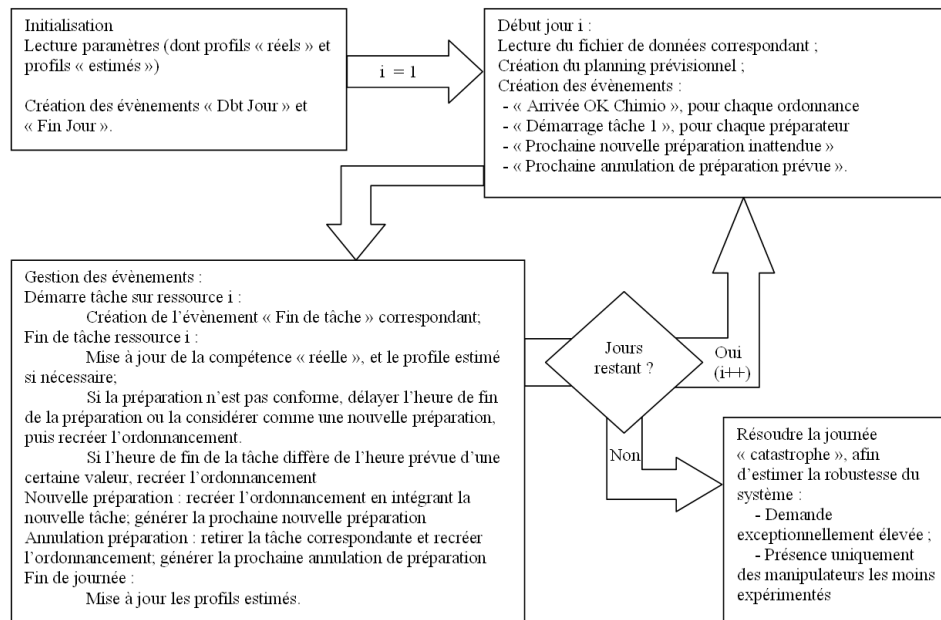


FIGURE 4.5 – Diagramme du fonctionnement de la simulation

Le système utilise les données issues de l'observation des manipulations pour mettre à jour les niveaux de performance estimés. La précision des données fournies à l'ordonnanceur dépend des technologies utilisées. Il n'est pas impensable qu'un relevé d'observations peu précises, comme peut l'être le report d'estimations des temps passés à chaque tâche par les préparateurs en fin de service, puisse aboutir à une estimation convenable des compétences. Les temps de traitement effectifs pourront également être sujets à une variabilité. La mise à jour des paramètres du personnel virtuel pourra être effectuée avec une fréquence prédéfinie.

Ce diagramme contient également des événements "annulation d'une préparation prévue" et "nouvelle préparation inattendue". Ces événements ne seront pas observés dans les expérimentations présentées dans ce document.

##### 4.3.3.1 Implémentation

L'intérêt est d'observer le comportement du système de planification face à des modèles comportementaux dont il ne peut pas connaître tous les paramètres. Le modèle comportemental utilisé dans la simulation sera donc volontairement plus complet que celui intégré à l'outil de planification, afin de représenter le fait qu'il est pour l'instant impossible de modéliser précisément le comportement humain, le fonctionnement de son cerveau ou l'ensemble des paramètres influant sur la performance professionnelle (ceux-ci incluant la vie privée). Le modèle utilisé dans un outil d'aide à la planification effectivement mis en place se devra évidemment d'être aussi précis que possible, mais bien que de très bonne qualité, il ne pourra pas être parfait. C'est pour représenter cette limite que nous utilisons volontairement des modèles peu évolués dans l'outil d'aide à la décision.

L'implémentation de la simulation a été effectuée en C++ pour plusieurs raisons. La possibilité de partager ce programme est pour une part importante dans cette décision. L'intérêt d'avoir une simulation qui nécessite un temps de calcul minimal est également à souligner dans une étude qui mènera à la comparaison entre des ensembles technologiques et organisationnels. Les deux types de décision n'étant pas forcément dépendantes l'une de l'autre, un grand nombre de scénarios devraient être observés pour une étude exhaustive.

Enfin, on peut citer l'encouragement émis dans [Sánchez \[2007\]](#), qui rappelle que l'utilisation d'un langage de programmation générique (et donc Turing-complet) permet d'implémenter tout type de problème et que si beaucoup appréhendent cette approche, cela peut s'avérer étonnamment facile dès lors que l'on sait comment la simulation fonctionne, et très didactique dans tous les cas.

#### 4.3.3.2 Modélisation des compétences

[\[Brailsford and Schmidt 2003\]](#), [\[Brailsford et al. 2006\]](#) proposent d'intégrer dans la simulation à événements discrets une approche théorique de modélisation du comportement humain au travers de desseins personnels : PECS (condition Physique, état Émotionnel, capacités Cognitives et statut Social) [\[Schmidt 2000\]](#). D'autres approches existent, comme [\[Bosse et al. 2009\]](#), qui visent à modéliser le comportement humain. Cette partie se concentre sur la description d'approches de modélisation de l'évolution des compétences.

[\[Boucher et al. 2007\]](#) est un état de l'art concernant la formalisation et l'utilisation des compétences pour l'optimisation des performances industrielles. Positionnant ce sujet de recherche au croisement de trois domaines : les sciences sociales/humaines, science du management, et du génie industriel, il se concentre sur l'aspect génie industriel, et plus précisément sur les façons de modéliser et formaliser les concepts de prise en compte de la compétence dans la littérature scientifique traitant de l'amélioration de la performance industrielle. Il traite le sujet à trois niveaux décisionnels : le design des processus, le management de la production et finalement la chaîne logistique, élément clé du management des organisations distribuées. A propos du design des processus, il rapporte que *"les liens entre évaluation de la performance, du design des processus et le management des compétences n'ont pas été traités dans la littérature. La compétence est considérée comme donnée d'entrée pour le management de projets ou la construction d'équipes mais n'est intégrée comme un résultat adjoint"*.

De nombreuses publications récentes traitent de la courbe d'apprentissage de différents actes chirurgicaux. L'avis général serait que [\[Wright 1936\]](#) décrit habilement l'aspect général de la courbe d'apprentissage au travers de la fonction  $T_j = T_1 j^{-l}$ , où  $T_j$  est le temps nécessaire pour produire la  $j^{me}$  unité et  $l$  est le "coefficient d'apprentissage" [\[Jaber and Bonney 1997\]](#).

Cette allure exponentielle vaut le qualificatif de "power law of practice" à la fonction d'apprentissage. La figure (4.3.3.2), extraite de [\[Ritter and Schooler 2001\]](#), montre bien l'acuité des suppositions de Wright car les observations de [\[Seibel 1963\]](#) reportées sur un repère logarithmique forment quasiment une droite.

---

Texte original : The links between performance evaluation of design process and competence management have not been explicitly addressed in the literature. Competence is considered as an input data for project management or team building but it is not integrated as a joint result  
learning slope

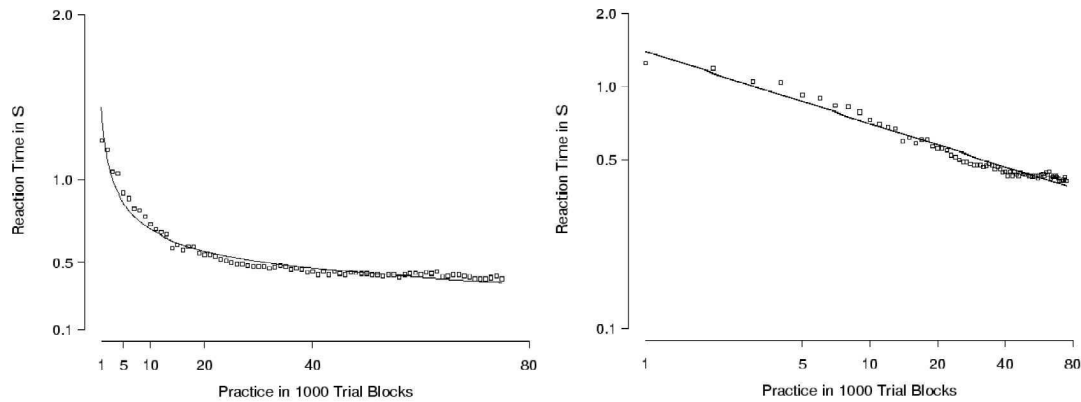


FIGURE 4.6 – "Time to perform a simple task on a linear and log-log plot as well as a power law fit to the data (adapted from Seibel, 1963)."

Globerson et al. [1989] étudient l'impact des interruptions de la répétition d'un tâche afin d'affiner la modélisation des courbes d'apprentissage. Jaber and Bonney [1997] décrivent, nomment et comparent trois approches de modélisation de la notion d'oubli. Les approches comparées sont :

- *Learn-Forget Curve Model* (LFCM), qui fut introduit par les mêmes auteurs dans [Jaber and Bonney 1996]. Cette approche prend en compte trois facteurs : le coefficient d'apprentissage, la quantité produite et la durée limite de la dégradation des compétences ;
- *Variable Regression to Invariant Forgetting* (VRIF), proposé par [Elmaghraby 1990], qui est un modèle considérant une fonction d'oubli unique.
- *Variable Regression to Variable Forgetting* (VRVF) [Elmaghraby 1990], qui considère que la fonction d'oubli est modifiée à chaque nouvelle interruption ;

Les observations de Jaber and Bonney [1997] sont que le *LFCM* est le plus pertinent. Cette conclusion sera plus tard remise en question par Nembhard [2001], qui observent de grandes divergences dans l'estimation des temps de production et une forte tendance du *LFCM* à sur-évaluer la durée des opérations. [Jaber and Sikström 2004] comparent trois modèles d'apprentissage et d'oubli, dont le *LFCM* et le *recency model* (RM), qui apparaissait la plus adaptée dans [Nembhard 2001]. Ce modèle apparaît incohérent avec le fait qu'une connaissance acquise récemment se perd plus aisément. Les résultats tendent à montrer que le choix d'une loi ou d'une autre dépend du type de procédures à réaliser et ne permettent pas d'effectuer un choix absolu sans d'autres expérimentations. [Kahol et al. 2009] observent les différences entre les actes physiques et cognitives dans l'apprentissage au travers d'observations dans une simulation. Un modèle d'estimation des compétences adapté au fait que les tâches qui nécessitent un savoir-faire cognitif et physiques sont assimilées différemment est proposé par [Jaber and Kher 2002]. Une grande difficulté sera alors de paramétrer ce type de modèle.

#### 4.3.3.3 Évolution des compétences des ressources simulées

Tous les manipulateurs sont considérés similaires, c'est à dire que nous supposons que deux manipulateurs ayant une quantité d'expérience égale ont un niveau de performance iden-

tique. Ce profile commun sera également invariant, sa configuration ayant été calculée afin de retrouver des données réalistes données par notre collaborateur pharmacien, praticien hospitalier et responsable du laboratoire de soins pharmaceutiques au CHU-N.

Les paramètres des manipulateurs sont contenus dans un fichier dédié. Nous allons maintenant décrire la structure de ce fichier, et en profiter pour introduire quelques notations :

- Nombre de manipulateurs (4, puis 8, voir le paragraphe suivant)
- Nombre de type de tâches (ici  $N = 3$ )
- (espace libre)
- Nom du manipulateur 1
- Expérience pour les tâches de type 1 ( $XP_{1,1}$ )
- ...
- Expérience pour les tâches de type N ( $XP_{1,N}$ )
- Ratio journée / journée éveillé
- *learning slope* du manipulateur 1 ( $l = 0.8631$ )
- Potentiel d'apprentissage idéal ( $L_{MAX} = 1$ )
- Valeur irréductible du facteur performance ( $L_0 = 0.5$ )
- Temps d'oubli total ( $TF = 3600$ )
- Variabilité des temps de manipulations ( $NoiseM$ )
- Influence de la fatigue (ici toujours = 0)
- (espace libre)
- Nom du manipulateur 2
- .....

Ces notations nous permettent de mieux expliquer comment a été adapté le *Learn Forget Curve Model* (LFCM) proposé par [Jaber and Bonney \[1996\]](#). Une adaptation était nécessaire car les tâches, bien que similaires, ne sont pas identiques et qu'elles ont une durée absolue supposée. Nous avons donc remplacé  $T_1$  par  $L_{MAX}$  (voir la section précédente, section 4.3.3.2), et nous avons également défini un facteur minimal  $L_0$ .

L'exécution d'une tâche  $j$  de type  $k$  qui a pour temps de processing supposé  $P_0$ , par un manipulateur  $i$  est  $P_i = P_0(L_0 + L_{MAX} \cdot XP_{i,k}^{-l}) \times (NoiseM/100 \cdot rand(-0.5, 0.5))$  ; où  $XP_{i,k}$  est le niveau d'expérience en tâches  $k$  du manipulateur  $i$ .  $rand(-0.5, 0.5)$  est une valeur aléatoire tirée entre -0.5 et 0.5 en utilisant une loi uniforme.

La quantité d'expérience reçue par le manipulateur  $i$  est égale à la durée  $P_0$  de la tâche divisée par la durée d'une journée "éveillée" (ici 16 heures). Cette durée est également le temps pendant lequel nous considérons qu'il peut y avoir un recul de l'expérience concernant un type de tâche  $t$ , à condition que le manipulateur n'ait pas fait de tâche de type  $t$  ce jour. L'algorithme de dépréciation de l'expérience est similaire à celui défini dans [\[Jaber and Bonney 1996\]](#) qui a subi la même adaptation que décrite ci-dessus.

Lorsqu'un manipulateur effectue sa première préparation de la journée, pour chaque type, nous calculons les ratios entre le temps qui aurait été nécessaire pour atteindre son niveau d'expérience, le temps d'oubli total et le temps de l'interruption ; ces valeurs nous permettent de calculer la courbure d'oubli  $f$  et le niveau d'expérience atteint sans l'interruption,  $H$ . La formule  $XP_{i,k}^{(f+l)/l} * H^{-f/l}$  nous donne le nouveau niveau d'expérience.

La figure 4.3.3.3 est un exemple de l'évolution des compétences d'un ensemble de manipu-



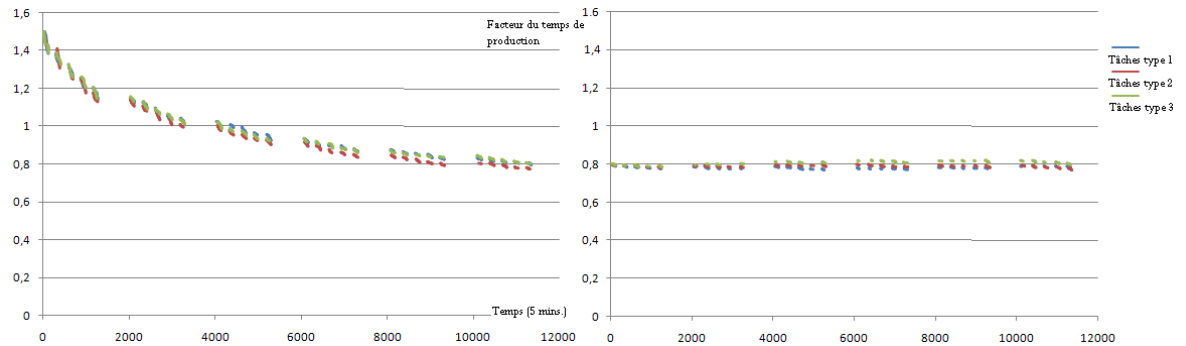


FIGURE 4.7 – Exemple d’évolution des compétences d’un manipulateur inexpérimenté (à gauche) et expérimenté (à droite) travaillant quotidiennement.

lateurs.

#### 4.3.3.4 Données

L’objectif principal de ces expérimentations est de comparer des politiques et stratégies d’affectation des ressources suivant des solutions technologiques incluant les objets *intelligents*.

Des fichiers de demande transformés nous ont été fournis par Alexandre Mazier, qu’il a créé à partir d’observations réelles lors d’une collaboration avec le service de pharmacie oncologique du centre Henry Kaplan du CHU Bretonneau de Tours (37), et qui est évoqué dans le papier correspondant [Mazier et al. 2010]. La trentaine de fichiers de demande ont dû être modifiés afin d’associer un type de difficulté à chaque préparation ainsi qu’une deadline associée, légèrement supérieure à la due date. Le type de chaque préparation est généré à partir de variables aléatoires uniformes et indépendantes.

Ces fichiers ont ensuite été concaténés deux à deux afin de disposer d’une demande prévue adaptée à quatre manipulateurs. Disposant de nombreux fichiers de demande, nous avons créé des instances qui, à partir des mêmes données, recréent une variabilité et des fluctuations de la demande réalistes dues au fait que certaines préparations sont effectuées à l’avance pour être administrées le week-end notamment. La "difficulté" des journées est estimée en fonction de la somme des temps de processing initiaux. Les journées dites "difficiles" font partie des deux derniers déciles.

Des instances ont été générées aléatoirement à partir des fichiers de demande. La figure 4.8 représente la quantité d’activité absolue (sans prendre en compte la performance de manipulateurs) requise par chacun des fichiers de demande. On y observe que le temps moyen par préparation ne varie quasiment pas. Vingt instances ont été générées à partir de cet ensemble de fichiers. Chaque instance représente un ensemble de six semaines de cinq jours. La génération des instances a été effectuée dans le but de représenter la "saisonnalité" hebdomadaire des ordres de production suivant les paramètres suivants :

Lundi et Mardi ont une demande comprise entre 255 et 290 unités de production (donc approximativement dans les fichiers 150 à 300).

Mercredi est une journée généralement un peu moins chargée, la demande se situe entre 160 et 250 unités de production.



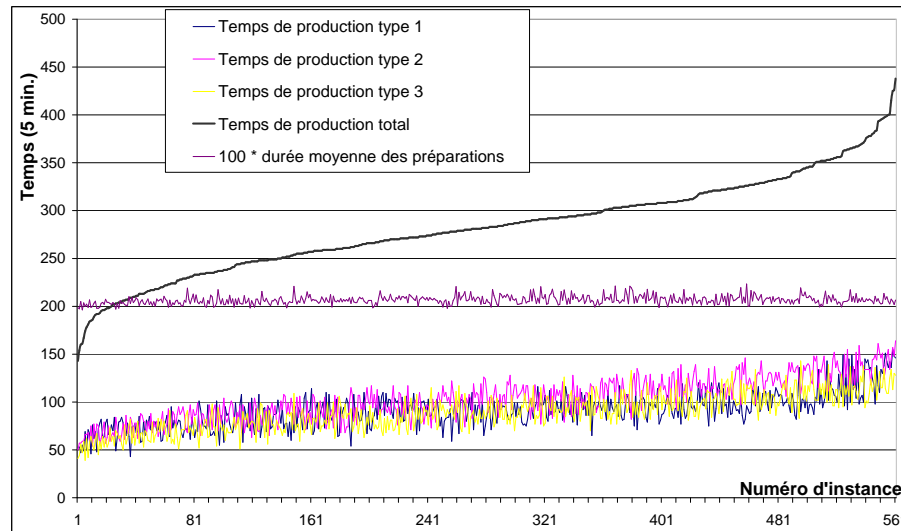


FIGURE 4.8 – Représentation des quantités d’activité des fichiers de demande prévisionnelle. Une unité de temps (axe vertical) égale 5 minutes.

Jeudi peut être une journée un peu plus chargée que la moyenne, la demande est comprise entre 255 et 310.

Vendredi est toujours une journée plus chargée, puisque des produits sont préparés pour être administrés le week-end. La demande est comprise entre 330 et 395 unités de production.

Les différentes possibilités seront observées à partir des deux mêmes configurations initiales des ressources. La première partie des résultats considère que l’on dispose de 4 manipulateurs que l’on utilise chaque jour. Deux de ces manipulateurs terminent tout juste leur formation et disposent au début des répliques d’un coefficient multiplicateur de 105% (expérience = 2,  $\forall$  type). Un manipulateur excelle dans la préparation de tous les types de produits (expérience = 4), et exécute les tâches en environ 80% du temps initialement prévu. Le dernier manipulateur est un nouveau stagiaire qui ne dispose d’aucune expérience (expérience = 1), et effectue les préparations en 150% du temps prévu.

**4.3.3.4.1 Profils et niveau de performance des ressources humaines** La fréquence de mise à jour des profils estimés des manipulateurs peut être largement réduite lorsque ceux-ci sont taggés et que des observations les concernant sont effectuées tout au long de l’activité. Dans le cas où aucune technologie ou aucun système d’informations spécifique n’est associé aux relevés de traçabilité des proches de chimiothérapies, il est difficile de connaître précisément l’évolution des temps de manipulation effectifs, et demander aux opérateurs de noter leurs paramètres peut s’avérer d’une faible précision et/ou trop chronophage. Même en supposant que les relevés d’informations sont assez précis, le traitement et l’intégration de ces données dans l’ordonnanceur doit être effectué avec une fréquence plus ou moins importante. Le fait qu’un responsable doive transcrire les informations manuellement peut rendre cette opération moins fréquente, et altérer la communication et la bonne entente entre les protagonistes et de ce fait l’acceptation du système.

Concernant les décisions relatives à la génération des ordonnancements, deux niveaux sont à prendre en compte. Le premier est de décider quels sont les manipulateurs qui travailleront dans l'isolateur.

La politique d'affectation que nous définissons suppose que l'on dispose d'une approximation de la quantité d'activité journalière assez précise pour qualifier la difficulté de la journée à venir. Nous séparerons dans cet exemple trois niveaux pour lesquels l'affectation s'effectue comme suit :

Une "petite journée" correspond à une demande de production inférieure à  $250 * 5$  min. Cela n'arrivera que les mercredis d'après la génération des instances décrite précédemment dans cette section.

Une "journée moyenne" contient une demande prévisionnelle incluse entre 250 et 300 unités de production.

Une "journée chargée" contient une demande initiale de plus de  $300 * 5$  min. La prévision de ces journées implique que l'on cherchera à réunir un ensemble de ressource des plus efficaces.

Plusieurs décisions sont à mettre en relation, qui concernent des aspects matériels et organisationnels. Les scénarios présentés par la suite ne seront testés que dans le cas où l'on considère que les détrompeurs utilisés sont assez réactifs et efficaces pour qu'aucune erreur ne survienne qui induise de retravailler les poches prêtes.

##### 4.3.3.5 Validation de l'ordonnancement et de la simulation

Nous avons vérifié que toutes les préparations requises pour une journée sont préparées au cours de celle-ci. Une vérification automatisée compte le nombre de préparations effectuées à chaque période et vérifie qu'il égale le nombre de tâches présentes dans le fichier de demande. Une observation des fichiers de résultats a confirmé qu'il n'y avait pas de doublons. Plusieurs vérifications bloquent le déroulement de la simulation si une situation absurde est observée. Elles permettent de s'assurer du fait qu'une tâche ne démarre pas sur une ressource déjà occupée, le fait que l'on n'effectue pas plusieurs fois la même tâche ou que les *release dates* initiales sont respectées. Aucun blocage n'a été observé durant les expérimentations menant aux résultats présentés dans la section suivante.

Afin de vérifier le bon fonctionnement d'une partie de la simulation et le comportement de l'algorithme d'ordonnancement, une instance particulière, nommée *instance connue*, a été définie telle qu'une solution optimale unique est connue. Cette instance considère trois manipulateurs dont l'expérience ne varie pas au cours du temps et dix tâche, nommées  $T_1$  à  $T_{10}$ . La performance des 3 manipulateurs connue de l'ordonnanceur est respectivement (1,2,2) ; (2,1,2) et (2,2,1) pour les 3 types de tâche (type1, type2, type3). Rappelons que cette performance est un multiplicateur du temps de production estimé pour chaque préparation. Cet ensemble de manipulateurs correspond donc à trois manipulateurs ayant chacun un bon niveau d'expérience pour un type de produit mais pas du tout pour les autres. Les paramètres des tâches sont présentées dans le tableau 4.2. Définissons un formalisme d'écriture des solutions : dans des accolades, chaque parenthèse séparée par un point-virgule correspond à l'enchaînement des tâches associées à un manipulateur. La solution présentée dans le tableau 4.2 s'écrit alors  $\{(T_1, T_2, T_3) ; (T_4, T_5, T_6) ; (T_{10}, T_7, T_8, T_9)\}$ . Cette instance a également permis d'observer le comportement de

Tableau 4.2 – Paramètres des tâches composant l'instance connue

Paramètres	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$	$T_8$	$T_9$	$T_{10}$
Release date	2	5	7	1	2	9	3	6	9	1
Due date	5	8	15	4	10	14	6	11	15	3
Type prod.	1	1	1	2	2	2	3	3	3	3
Temps Prod. Init.	4	3	6	4	6	4	4	5	3	2
Dead line	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Solution optimale										
Start Date	2	6	9	1	5	11	3	7	12	1
Ressource en charge	1	1	1	2	2	2	3	3	3	3
Completion time	5	8	15	4	10	15	6	11	15	2

l'heuristique Tabou. Nous avons par exemple classé les tâches par index décroissant dans un premier temps, ce qui mène à une solution initiale de mauvaise qualité :  $\{(T_8, T_3, T_2); (T_7, T_6, T_5); (T_{10}, T_9, T_4, T_1)\}$ . Le classement des tâches, qui impacte la création de la solution initiale dans un premier temps, peut être par la suite modifié à la volée. Le parcours des échanges deux à deux du positionnement des tâches et de leur affectation aux ressources est alors différent. Cela peut avoir pour conséquence d'accepter temporairement plus de modifications. Les échanges et réattributions des tâches aux ressources seront de toute façon tous observés pour ne conserver que le meilleur. L'impact de cette modification n'implique une différence que lorsque deux modifications de la solution aboutissent à un même score (même retard et même temps total de manipulations).

Les paramètres d'évolution des compétences ont été validés visuellement au travers de l'observation de courbes du même type que celles présentées figure 4.3.3.3.

#### 4.3.3.6 Comparaison des méthodes d'ordonnancement

La génération des ordonnancements et leur mise à jour doit être assez rapide pour être bien acceptée par le service. Nous avons comparé la méthode de résolution par programmation linéaire en nombres entiers utilisant la version 12.1 de CPLEX à la première partie de la méthode tabou, décrites section 4.3.2.1 et 4.3.2.2. Le tableau 4.3 compare les résultats observés après différentes durées d'exécution de l'heuristique Tabou par rapport aux bornes inférieures et aux meilleures solutions réalisables trouvées par CPLEX en 5 minutes (300 secondes). Cette comparaison a été effectuée à partir des 561 fichiers de demande. Nous n'avons pas présenté les Gaps du fait que les bornes inférieures sont souvent égales à zéro.

Ces résultats illustrent bien l'intérêt d'utiliser une méthode heuristique dans un cadre opérationnel. L'utilisation de la une méthode exacte telle que définie ici n'est pas adaptée à ce problème.

#### 4.3.4 Expérimentations / Résultats

De nombreux niveaux de décision découlent de ce problème. En plus des paramètres que sont la composition de l'équipe et la complexité de la demande, les positions concernant l'es-

Tableau 4.3 – Comparaison des ordonnancements générés via CPLEX et Tabou. *Les écarts sont moyennés par rapport au nombre de borne inf. non atteintes.*

Méthode utilisée	Durée (sec.)	# solutions optimales	Ecart moy. B.Inf.		# Cplex meilleure sol <sup>n</sup>	# Tabou meilleure sol <sup>n</sup>
			Nb Deadline	$\sum$ retards		
CPLEX	300	79	20.6	952.3	N/A	N/A
Tabou	1	376	5.8	73.5	33	455
Tabou	2	444	3.2	43.5	19	467
Tabou	5	497	1.5	20.3	7	476
Tabou	10	511	0.9	11	3	480
Tabou	60	527	0.1	0.8	1	482
Tabou	120	527	0.1	0.8	1	482

timisation de l'évolution de la performance des manipulateurs et les objectifs de la génération des ordonnancements multiplient les possibilités. La meilleure solution, dans certains cas, peut paraître évidente, surtout lorsque l'on ne se soucie pas des investissements nécessaires à la mise en pratique des choix retenus.

Nous avons vu en section 4.3.3.2 que les méthodes d'estimation de l'évolution des profils et performances des employés étaient complexes et incomplètes. Les technologies de reconnaissance de l'activité permettent d'alimenter des bases de données qui peuvent servir à mieux paramétrer ces modèles.

Les expérimentations proposées ici visent à observer dans un premier temps l'impact de la fonction utilisée pour anticiper la performance des employés. Ensuite nous différencierons la qualité de l'approximation des performances en fonction du délai de mise à jour des profils. Les paramètres comparés représentant des méthodes et contraintes relatives à l'utilisation de solutions matérielles et logicielles.

#### 4.3.4.1 Indicateurs de Performance

L'observation du déroulement par simulation a pour but d'observer différents indicateurs de performance relatifs au système de production des solutions injectables. Les indicateurs retenus traitent de plusieurs dimensions de la performance, répertoriés ci-dessous.

**Qualité de service : Respect des dates échues.** Quantifiée par les retards observés dans les conditions "normales". On observe la somme des retards de livraison, que nous noterons *QoS 6 sem.*, ou *Qualité de Service 6 sem.* lors de la présentation des résultats. Nous avons généré une *deadline* pour chaque préparation, qui correspond à la date échue plus un certain nombre de fois la durée de préparation absolue. Nous estimons qu'il est plus important d'équilibrer les retards entre les patients que de voir une tâche très en retard par rapport aux autres ; cet indicateur, "nombre de deadlines dépassées", est factorisé par une valeur importante (10 000) dans les algorithmes de résolution. Le nombre de dépassements de cette limite est dénommé *DeadLine*.

**Risque : Robustesse face aux aléas.** Nous avons supposé pour cette étude qu'aucune préparation non conforme à la prescription ne pouvait être livrée car différents systèmes permettent de contrôler la conformité des préparations. Les détrompeurs permettant de

détecter d'éventuelles erreurs de manipulation et de dosage impliquent un besoin de post-traitement des poches préparées, acte chronophage qui n'est pas sans conséquences sur la qualité du service rendu, ne font pas partie des scénarios observés ici. Cet indicateur est donc uniquement composé d'une mesure de la qualité de service dans le cadre d'un scénario catastrophe. Il correspond à la pire des instances "journée" que nous ayons à notre disposition, assortie du fait que seulement les trois manipulateurs ayant le moins d'expérience (estimée) seront présents. Cet indicateur sera noté *QoS Catastrophe* dans les tableaux de résultats, il est composé des deux parties de la mesure de la qualité de service, à savoir *Tardiness* et *Deadline*, de même que l'indicateur *QoS 6 sem.*.

**La qualité de l'estimation des compétences.** Estimée au travers de la différence entre les temps estimés pour effectuer les différentes préparations et le temps réel observé. Un écart supérieur à la valeur arbitraire de 2 minutes implique que l'on relance l'ordonnanceur afin de prendre en compte cet écart. Les valeurs correspondant à cet indicateurs sont :

1.  $\delta$  Date de fin = dates de fin prévues - dates de fin observées ;
2.  $\delta$  Durée = durées prévues — durées observées ;
3. Nb M.A.J. Ordo est le nombre de mises à jour de l'ordonnancement effectuées pendant la durée des observations. Cette est significative de l'estimation des performances car elle représente le nombre de fois que  $\delta$  Date de fin a été supérieur à 2 minutes (donc 0.4 unités de temps).
4. Niveaux de compétences final : La moyenne des compétences (Moyenne  $G^{le}$ ), et les écarts types par rapport à cette moyenne qui désignent l'écart de compétences entre les ressources (Ectyp Moy) et le niveau de spécialisation des ressources (Moy. Ectyp).

Concernant l'estimation des performances, il est important de rappeler que les durées de manipulation étant inversement proportionnelles au niveau d'expérience des manipulateurs. Ainsi, le fait que l'estimation d'une durée de manipulations se révèle inférieure (resp. supérieure) au temps effectivement observé signifie que l'on a surestimé la compétence du manipulateur.

#### 4.3.4.2 Fréquence de mise à jour des profils estimés des employés

Nous comparons ici deux valeurs. **OncePerDay** si on met à jour les profils à la fin de chaque journée ou **OncePerObs** si ils sont mis à jour à chaque fois qu'une nouvelle valeur est entrée.

Un profile surestimé mènera à des retards et donc à une éventuelle dégradation de la qualité de service. Sousestimer la performance d'un manipulateur implique que l'on allouera une ressource pour plus de temps que ce qu'il n'est nécessaire, et que celle-ci patientera avant que la prochaine préparation ne soit prête. Si le temps d'attente est supérieur à 4 minutes, le préparateur demandera une mise à jour de l'ordonnancement. Nous relèverons donc ici les durées d'inactivité des ressources, en parallèle avec la qualité de service.

Les résultats du tableau 4.4 montrent l'intérêt de disposer d'une mise à jour des profils des employés en temps réel au niveau de l'estimation des profils. La mise à jour des profils utilise la moyenne du ratio  $\frac{\text{temps observé}}{\text{temps de processing initial}}$  effectuée sur les 50 dernières observations. Cette valeur correspond au nombre de préparations réalisées au cours d'une journée chargée ; elle a

Tableau 4.4 – Fréquence de mise à jour de la performance estimée des manipulateurs

Fréquence M.A.J. compétences	QoS 6 sem.		QoS Catastrophe		Écarts d'estimation compétences				Nb. M.A.J. Ordo.
	DeadLine	Tardiness	DeadLine	Tardiness	abs( $\delta$ Date de fin)	$\delta$ Date de fin	abs( $\delta$ Durées)	$\delta$ Durées	
Chaque jour	1	37.5	40	507	661	633.5	251	243	341
Chaque observation	1	37.3	42	555	609.4	584	204.1	196.7	262

été choisie car elle correspond à ce que l'on peut fournir comme informations à un ordonnanceur lorsqu'aucune acquisition d'information n'est automatisée. Les résultats de cette première expérimentation sont que les deux scénarios mènent à une qualité de service similaire. L'estimation de la performance est évidemment plus précise lorsqu'elle est effectuée plus souvent, ce qui se traduit au niveau de la fréquence de mise à jour l'ordonnancement. L'utilisation de données précises et en temps réel peut permettre d'affiner la mise à jour des profils employés estimés. La partie suivante traite ce sujet.

#### 4.3.4.3 Fonction utilisée pour mettre à jour des profils estimés des employés

Nous observerons deux fonctions assez peu précises dans l'absolu par rapport aux possibilités émises dans la littérature, notamment des méthodes statistiques (voir section 4.3.3.2).

Les fonctions observées pour prévoir les temps de manipulations à venir utilisent l'historique des transformations préparées. Une première approche consiste en un calcul de la moyenne des  $X$  dernières préparations. Elle semble *a priori* peu adaptée à la phase d'apprentissage d'un novice souvent sollicité. Dans le tableau de résultats 4.5, l'utilisation de cette approche est notée  $Moy(X)$  si l'ordonnanceur prend la moyenne des  $X$  dernières observations d'un ensemble Manipulateur, Type de préparation.

La seconde fonction utilisée pour mettre à jour les profils des employés dans l'ordonnanceur est notée  $RegLin(X)$  dans le tableau 4.5. Elle consiste en une régression linéaire, pondérée par la durée écoulée entre les dates d'observation et celle de la mise à jour du profil. Le dernier point observé a donc un poids plus important que le  $X^{me}$  plus ancien pour prévoir la performance de la prochaine manipulation. L'estimation de la durée de préparation d'un point à venir est calculée à partir d'un coefficient directeur issu des précédentes observations. Celui-ci est calculé en effectuant la moyenne pondérée par les durées écoulées sur  $X$  derniers relevés d'observations. La compétence estimée est alors le projeté du dernier point d'observation à une date égale à la date actuelle plus une valeur également déterminée au travers d'une moyenne pondérée des  $X$  dernières durées inter-production observées. Lors d'un changement de journée, on utilise la valeur absolue du coefficient directeur car on sait que le manipulateur n'améliorera pas son niveau d'expérience. Le cas particulier où  $X = 1$  implique que l'on utilisera la dernière valeur d'observation ( $\frac{\text{temps observé}}{\text{temps de processing initial}}$ ), quelle que soit la fonction utilisée.

On observe au travers de ces résultats que si l'utilisation de la moyenne des observations permet globalement d'obtenir une bonne qualité de service, elle estime en fait assez mal la performance des manipulateurs. Le nombre de mises à jour de l'ordonnancement augmente significativement avec le nombre d'observations utilisées pour calculer la moyenne. QoS Catastrophe est également dégradée à cause du de la mauvaise qualité de l'estimation des compétences, qui a tendance à surévaluer les temps de manipulation nécessaires et par conséquent à limiter le temps disponible pour mieux former le personnel. Rappelons que si  $Moy(1)$  provoque dans ce

Tableau 4.5 – Comparaison des fonctions d'estimation de la performance des manipulateurs

Méthode estim. compétences	QoS 6 sem.		QoS Catastrophe		Erreurs d'estimation des compétences				Nb. M.A.J. Ordo.
	DeadLine	Tardiness	DeadLine	Tardiness	abs( $\delta$ Date de fin)	$\delta$ Date de fin	abs( $\delta$ Durées)	$\delta$ Durées	
Moy(1)	0	38.1	23	241	262.8	139	51.1	26.4	26
Moy(10)	0	37.3	40	529	357	284	77.1	62.9	61
Moy(50)	1	37.3	42	555	609.4	584	204.1	196.7	262
Moy(250)	1	38.4	11	82	1144.8	1 110	681.1	669	958
Moy(500)	1	38.7	9	63.6	1294.7	1258	845.4	832.7	1 147
RegLin(10)	4	61.5	27	289	287.6	187	55.3	34.9	36
RegLin(50)	1	49.8	24	238	282	158	52.1	27.5	27
RegLin(250)	0	41.1	29	353	277.3	156	51.7	26.6	32
RegLin(500)	0	41.9	29	349	271.1	153	51.7	27.8	30

cas de très bonnes estimations de la performance instantanée, c'est à cause du fait que les temps de manipulation ne sont sujets à aucune variabilité et que les manipulateurs sont affectés à l'isolateur chaque jour ouvré.

L'amélioration relative de "QoS Catastrophe" pour Moy(250) et Moy(500) vient du fait que l'estimation des performances implique que la seconde partie de l'ordonnanceur, qui a pour objectif de former des manipulateurs multi-compétents, ne peut pas être efficace. Les manipulateurs se spécialisent donc dans un type de préparation. D'autres résultats concernant l'absence de cette partie de l'algorithme seront présentés ultérieurement. Cette observation nous fait remettre en question la pertinence de notre scénario catastrophe, qui pourrait être plus significatif si il privilégiait fortement un type de tâches.

On observe au travers du rapport entre  $\delta$ Durées et abs( $\delta$ Durées) que RegLin(10) a plus tendance à surestimer la performance des manipulateurs que Moy(1). Cela implique une baisse de la qualité de service car l'heuristique Tabou ordonnance les tâches juste à temps pour maximiser le temps total de préparation. Les observations considèrent différents niveaux de variation des durées de préparation. Nous avons choisi d'y comparer Moy(1) et RegLin(250). Cette dernière a un niveau d'estimation des compétences acceptable et la meilleure QoS parmi les différentes valeurs de RegLin.

#### 4.3.4.4 Constance de la performance

Plusieurs solutions matérielles permettant d'assurer la qualité des préparations, il est intéressant de définir et d'observer les différences probables entre ces solutions au niveau de la qualité des relevés d'information et les implications induites au niveau de la qualité de l'estimation des profils des manipulateurs. Si on suppose qu'aucune technologie de traçabilité n'est mise en place, ou que les informations relevées par celle-ci ne sont pas interfacées avec l'ordonnanceur, il est nécessaire que les manipulateurs ou un observateur relève les durées de manipulations. Ce processus additionnel peut, au quotidien, mener à des écarts entre données relevées et la donnée réelle. De plus, l'alimentation du module d'estimation de la performance des manipulateurs devra s'effectuer manuellement, avec une fréquence d'au plus une fois par demi-journée, et plus vraisemblablement d'une fois par jour puisque le staff "isolateur" est affecté par période d'un jour. Même avec une technologie telle que le code barre, les relevés d'informations provenant d'une action manuelle, il est possible que les dates de lecture ne correspondent pas parfaitement



moments auxquels la production d'une préparation a démarré ou s'est terminée.

En parallèle à cela, il est question de la constance de la performance des manipulateurs. Si l'aspect général de l'évolution de la performance a le même aspect, il ne faut pas oublier que le modèle n'a jusqu'à présent pas été assujéti à un quelconque bruit qui serait forcément observé dans des conditions d'observations réelles. Les valeurs sujettes à un bruit dans les observations présentées ici ne concernent que les durées observées. Elles correspondent également, pour la partie "estimation des performances", au cas où les données relevées sont précises mais la performance des ressources localement bruitée, comme cela serait très probablement le cas dans des conditions réelles.

Le tableau 4.6 compare donc des scénarios pour lesquels les observations temporelles ont une variabilité plus ou moins importante, correspondant grossièrement à des ensembles matériels associés à un niveau de sensibilisation et d'acceptation du système par les manipulateurs.

La valeur de variation des durées de préparation est une absolue, la formule utilisée fait que si le paramètre de variation est  $X$ , les manipulations dureront leur valeur initiale plus ou moins  $X/2$ . L'expérimentation a été répliquée 100 fois, les résultats de ce tableau sont des valeurs moyennes.

Tableau 4.6 – Impact de l'irrégularité des temps de manipulation observés

Méthode estim. compétences	Var. durée de préparation	QoS 6 sem.		QoS Catastrophe		Erreurs d'estimation des compétences		Nb. M.A.J. Ordo.
		DeadLine	Tardiness	DeadLine	Tardiness	abs( $\delta$ Durées)	abs( $\delta$ Date de fin)	
Moy(1)	0%	0	38.1	23	241	51.1	262.8	26
	2%	5.4	63.4	30.3	375.2	58.1	291.2	33
	5%	3.1	53.5	27.5	326.6	58	288.7	32.1
	10%	1.5	47.1	24.8	259.5	56.9	280	30.5
RegLin(250)	0%	0	41.1	29	353	51.7	277.3	32
	2%	5.3	59.1	28.2	330	59.3	296.2	34.4
	5%	3.6	55.4	27.1	310.3	59	291	32.9
	10%	1.4	47.5	25.2	269.7	57.9	285.4	31.8
	15%	0.9	43.8	24.4	251	56.7	279.3	30.9
	20%	0.6	41.6	26.4	286.6	56.3	270.4	30.1
	50%	0	28.5	21.9	195.1	53.8	226.6	28.3

Rappelons que l'ensemble du personnel travaillant à l'isolateur chaque jour, la perte d'expérience est par conséquent faible. Aussi, même lorsqu'aucune variabilité n'est appliquée aux durées des préparations, la grande majorité des ré-ordonnancements est due au fait que l'ordonnanceur sousestime la performance des manipulateurs, qui s'améliore globalement puisque la configuration initiale intègre un novice et deux manipulateurs moyennement formés.

L'heuristique d'ordonnancement utilisée ayant comme objectif de maximiser le temps de production, l'occurrence d'une légère augmentation du temps de production par rapport au niveau d'expérience du manipulateur implique une dégradation de la qualité de service.

L'augmentation de cette variabilité implique une réduction relative de la qualité de service ainsi que de l'estimation des performances. Cela est dû au fait que, lorsque l'ordonnancement est remis à jour, la durée de la dernière préparation est probabilistiquement plus éloignée de la durée de préparation correspondant au niveau d'expérience du manipulateur. Les algorithmes de mise à jour des performances estimées va alors surestimer la performance du manipulateur en question. Il anticipe alors l'évolution des compétences de ce manipulateur. C'est pour cette raison, et parce que l'évolution globale des compétences des manipulateurs est unilatérale (elles s'améliorent), qu'une grande variabilité ( $\pm 25\%$ ) implique de meilleurs résultats qu'aucune va-



riabilité lorsque l'on utilise RegLin(250), et que même si l'estimation des durées de production est moins bonne, la prévision des dates de fin est globalement meilleure. Cette observation montre l'intérêt que l'on aurait à remettre à jour les profils estimés des manipulateurs et l'ordonnancement régulièrement, sans forcément attendre un écart important entre observations et prévisions.

#### 4.3.4.5 Politiques d'ordonnancement

Cette section propose une série d'expériences concernant les impacts de la politique d'ordonnancement choisie, suivant différents ensembles de ressources humaines. Les expérimentations présentées ici incluent le choix des quatre manipulateurs affectés à l'isolateur parmi les 8 disponibles. Les profils des quatre manipulateurs additionnels sont identiques à ceux considérés dans les cas précédents. La fonction d'estimation des performances est Moy(1), considérant qu'il n'y a aucune variance dans les durées de préparations par rapport à la compétence théorique des manipulateurs.

**4.3.4.5.1 Politique de roulement des manipulateurs aux postes de préparateur** *Pol. 0* est une politique aveugle qui affecte aléatoirement les ressources aux postes de manipulateurs, ce qui pourrait par exemple correspondre au cas où leur niveau d'expérience est inconnu, ou à un choix d'affectation basé uniquement sur le volontariat d'employés tous très motivés pour effectuer les préparations pharmaceutiques. *Pol. 1* et *Pol. 2* sont deux variantes de directives intuitives et réalistes qui déterminent l'ensemble des manipulateurs en fonction de la difficulté prévue de la journée à venir. Les deux politiques affectent les ressources aléatoirement les jours d'activité moyenne. Lorsqu'une faible quantité d'activité est prévue, *Pol. 1* choisit les ressources dont la somme des compétences estimées est la plus faible. *Pol. 2* démarre un processus qui parcourt successivement les types de produits du plus demandé au moins demandé. Sera choisie la ressource restante dont la somme des compétences, excluant le type de produit en cours, est la plus faible. Si le nombre de postes de préparateurs est supérieur au nombre de types de produits, les derniers manipulateurs sont sélectionnés de la même manière que dans *Pol. 1*. Les jours où l'activité est importante, *Pol. 1* affecte à l'isolateur les ressources ayant la plus grande somme des compétences. *Pol. 2* sélectionne les types de produits par ordre de demande décroissante, et affecte à l'isolateur la ressource ayant le meilleur niveau estimé pour ce type de produits. S'il y a plus de postes de préparateur que de types de produits, la somme des compétences est utilisée pour sélectionner les manipulateurs parmi les ressources restantes.

Tableau 4.7 – Stratégies d'affectation des ressources aux postes de l'isolateur.

Sélection des ressources	QoS 6 sem.		QoS Catastrophe		Niveaux de compétences final		
	DeadLine	Tardiness	DeadLine	Tardiness	Moyenne $G^{le}$	Ectyp Moy $G^{le}$	Moy Ectyp
Pol. 0	0.52	5.42	47.1	981.7	2.78	0.284	0.317
Pol. 1	0.32	3.15	53	1545.8	2.77	0.722	0.707
Pol. 2	0.873	13.13	45.8	823.5	2.79	0.109	0.198

Tous les indicateurs positionnent la sélection aléatoire des manipulateurs (*Pol. 0*) entre les deux autres. La politique de sélection des manipulateurs suivant leur performance globale améliore la qualité de service mais réduit la robustesse du système face aux aléas. La variation du

Tableau 4.8 – Stratégies de génération de l’ordonnancement et de dégradation anticipée de la performance.

Politique et dégradation QoS (mins.)	Config. Tabou	QoS 6 sem.		QoS Catastrophe		Compétences en fin d’exercice		
		DeadLine	Tardiness	DeadLine	Tardiness	Moyenne G <sup>le</sup>	Moy Ectyp Moy G <sup>le</sup>	Moy Moy Ectyp
Pol. 1 & DQoS(0)	No Step2	0.29	470.1	68.55	2079.9	2.75	1.02	0.59
Pol. 1 & DQoS(0)	Step2	0.32	3.15	53	1545.8	2.77	0.72	0.707
Pol. 1 & DQoS(15)	Step2	1.11	74.6	53.3	1613.9	2.76	0.73	0.16
Pol. 1 & DQoS(30)	Step2	2.81	99.8	52.65	1591.7	2.76	0.72	0.16
Pol. 2 & DQoS(0)	No Step2	0.86	284.9	46.2	741.4	2.78	0.33	0.96
Pol. 2 & DQoS(0)	Step2	0.873	13.13	45.8	823.5	2.79	0.109	0.2
Pol. 2 & DQoS(15)	Step2	1.79	85.6	45.6	834.4	2.79	0.12	0.18
Pol. 2 & DQoS(30)	Step2	4.1	63.3	44.8	796.2	2.79	0.12	0.18

niveau d’expérience global des manipulateurs en fin d’exercice est très faible. L’écart entre ses bornes, 2.773 (*Pol. 1*) et 2.789 (*Pol. 2*), implique une variation du facteur des temps de manipulation de deux millièmes. Ces valeurs sont est bien moins représentatives que la spécialisation des manipulateurs à un type de manipulations et les écarts de formation entre eux. C’est cette différence qui explique la faible robustesse du système induite par la politique (*Pol. 1*). À titre indicatif, le multiplicateur des temps de préparation varie d’environ 12.5% entre des niveaux d’expérience de valeurs 2 et 2.7, et de 7.7% pour des niveaux d’expérience compris entre 2.7 et 3.4. Il varie de 8.2% entre les valeurs d’expérience 2.4 et 3, et de moins de 3% lorsque le niveau d’expérience passe de 2.6 à 2.8.

La politique (*Pol. 2*) décide des manipulateurs à affecter à l’isolateur en prenant en compte le détail de leur niveau d’expérience. On observe une dégradation de la qualité de service, qui correspond à un retard cumulé de 50 minutes sur six semaines par rapport à la politique précédente, additionnée à un dépassement du retard tolérable d’une préparation pour douze semaines en moyenne. La robustesse est par contre améliorée, ce qui est dû au fait que l’expérience des manipulateurs est à la fois plus équilibrée et plus homogène.

**4.3.4.5.2 Stratégie adoptée pour la génération des ordonnancements** Partant du fait que nous utilisons l’algorithme décrit dans la section 4.3.2.2, la stratégie d’ordonnancement est liée au temps imparti à la seconde étape de l’ordonnancement. *No Step2* indique que l’on n’utilise pas la seconde étape de l’algorithme Tabou. Cela implique que l’ordonnancement généré vise uniquement la minimisation du temps de manipulations. Le temps imparti à cette partie de l’algorithme (*Step2*) est de six secondes pour l’ordonnancement initial, et de trois secondes lors de ré-ordonnements.

Le choix de dégrader la qualité de service volontairement est la seconde composante de la définition de cette stratégie. Exprimé en pourcentage de l’allongement de la durée prévue pour les préparations (due date - release date). DQoS(*X*%) indique que l’on allonge cette durée artificiellement de *X*% pour la résolution. Les indicateurs de retard et dépassement de deadline ne prennent pas en compte ce prolongement.

Ce tableau de résultats est le premier à intégrer des scénarios n’incluant pas la seconde partie de l’heuristique, qui vise à maximiser le temps total des manipulations. On observe une meilleure qualité de service lors du fonctionnement usuel du service (QoS 6 sem.). Bien que Tardiness soit plus élevé, la priorité est affectée au respect des deadlines. La robustesse du système

est toutefois moindre dans ce cas ; cela est dû au fait que les écarts de formation entre les manipulateurs (Ectyp Moy) et entre les compétences propres des manipulateurs (Moy Ectyp) sont plus élevés. L'ensemble des scénarios aboutissent à une moyenne générale des compétences très proche, l'utilisation de *Pol. 2* implique une légère amélioration.

Les apports en robustesse induits par la dégradation volontaire de la qualité de service sont assez faibles, pour ne pas dire négligeables.

### 4.3.5 Conclusions de l'étude

Les expérimentations présentées ici montrent l'intérêt de générer convenablement les affectations des ressources aux postes de préparation, suivant les jours. Une mise en pratique nécessiterait l'inscription d'un ensemble de ressources désireuses de diversifier leurs compétences, l'affectation de ces manipulateurs s'effectuant par la suite en considérant toute cette liste.

Nous observons également que la complexité émanant de la considération de manipulateurs en tant que machines indépendantes rend la résolution par méthode exacte peu efficace si la génération de l'ordonnancement doit être effectuée rapidement. Une durée de 5 minutes étant déjà inacceptable pour des mises à jour suite à l'occurrence d'incidents.

Les résultats concernant les décisions présentées ici sont liées aux suppositions et approches de modélisation effectuées. Nous avons vu par exemple qu'il serait intéressant de modifier l'approche de mesure de la robustesse car le scénario catastrophe actuel demande des types de préparations trop diversifiés. Plusieurs autres pistes d'amélioration et de prolongement de cette étude sont envisageables :

**4.3.5.0.3 L'amélioration du modèle de compétences utilisé pour simuler les ressources humaines** Des modèles plus complets existent en ce qui concerne la modélisation des compétences humaines. Il serait notamment intéressant de discerner les sous-parties de la production de médicaments afin de pouvoir utiliser une modèle comme le Dual Phase Learn Forget Model [Jaber and Kher 2002]. Approfondir la granularité de la description de l'acte de préparation médicamenteux pourra notamment mener à la prise en compte du fait que certaines compétences en impactent d'autres. Une approche hiérarchique peut être une bonne approche, une compétence globale étant liée à tous les types de préparations. La variabilité de la performance telle que nous l'avons testée s'avèrerait plus réaliste en utilisant d'autres paramètres, comme l'utilisation de variables aléatoires normales, d'espérance décroissante relativement au niveau d'expérience et pas forcément centrée. Enfin, la prise en compte de facteurs extérieurs au niveau d'expérience permettrait d'améliorer le réalisme de cette simulation. Si certains de ces facteurs, notamment les facteurs physiques et environnementaux, semblent aisément intégrables [Garnerin et al. 2007], d'autres tiennent de l'aspect psychologique des ressources humaines et le paramétrage du modèle s'avèrera extrêmement complexe [Emmett J. Lodree et al. 2009].

**4.3.5.0.4 L'amélioration des politiques d'ordonnancements** En parallèle à l'amélioration de la modélisation des compétences simulées, il semble logique d'intégrer des outils d'estimation de la compétence plus complets à l'outil d'ordonnancement, à commencer pourquoi pas par la LFCM que nous avons utilisé ici pour simuler l'acquisition d'expérience. L'outil

d'ordonnancement, basé sur une heuristique de type Tabou, peut également être amélioré. Une comparaison plus complète des temps d'amélioration des solutions, notamment de la partie 2 de l'heuristique, peuvent être menées et leur pertinence varier en fonction des autres paramètres comme la méthode d'estimation des profils. Différents algorithmes de diversification sont envisageables, par exemple la création de plusieurs solutions initiales, sur le même algorithme que ce que nous présentons section 4.3.2.2 mais utilisant une règle de classement des tâches différente. Un intérêt de les mettre en place sous forme d'un algorithme multi-thread est qu'il utilisera alors au mieux les architectures multi-cœurs des processeurs modernes. Cette observation a une moindre importance dans le cadre d'études prospectives que pour une mise en place effective de l'ordonnanceur, car l'utilisation des différents processeurs permet dans le second cas de lancer plusieurs répliques ou instances en parallèle.

La réactivité du système peut également être améliorée, une simple amélioration consistant en une remise à jour de l'ordonnancement dès qu'une date de fin prévue est dépassée d'un laps de temps supérieurs à celui toléré. Le nombre d'occurrences de surestimation est toutefois extrêmement limité et donc l'impact de cette modification d'autant plus négligeable dans notre cas en particulier.

**4.3.5.0.5 L'investigation d'autres scénarios** Cette piste de recherche inclut à la fois des scénarios matériels et organisationnels. Une première perspective est la considération d'autres formes de détrompeurs, pas forcément amonts aux erreurs de manipulation. Ces erreurs pourront mener à un besoin de re-doser un produit, nécessitant de repasser l'injectable dans l'isolateur, à la nécessité de recommencer la préparation, mais aussi à son éventuelle arrivée au lit du patient. Le détrompeur actuellement utilisé est la double vérification, qui consiste en une vérification visuelle par un autre manipulateur. Nous avons également négligé l'apparition d'événements inattendus dans les scénarios menant aux résultats présentés ici, du fait que le nombre d'annulations équivalait au nombre d'arrivées inattendues. Observer les impacts de l'apparition d'ordres de production et d'annulations de dernière minute serait un autre prolongement intéressant de cette étude.

Certaines propositions d'améliorations nécessitent de représenter des interactions entre manipulateurs, de modéliser la perception qu'ont les ressources humaines de leur environnement, et de considérer des possibilités décisionnelles personnalisées. Ces remarques poussent à transformer l'outil que nous présentons ici, orienté objets, vers un paradigme orienté agents.

## Conclusions et perspectives du chapitre

Ce chapitre soulève des problématiques particulières que peuvent soulever l'utilisation de technologies RFID à deux niveaux, la logistique et la production, considérant des modifications organisationnelles rendues possibles ou facilitées par l'utilisation d'étiquettes radio-communicantes dans un service de production de préparations pharmaceutiques. Ces points montrent une fois de plus que la grande difficulté dans l'évaluation des impacts des technologies de communication sans contact est que la recherche du profit maximal par rapport à ces technologies nécessite une réingénierie des systèmes. De plus, certaines particularités de chaque

système peuvent influencer la pertinence des décisions prises, ce qui rend pertinent la création d'outils reconfigurables plutôt que l'élaboration de listes de recommandations.

Les modèles de simulation implémentés dans les études présentés nécessitent toutefois un ensemble de paramètres pour représenter précisément le fonctionnement des services étudiés. Il est regrettable que le projet-pilote MISTRALS n'ait pas abouti à une mise en place effective des technologies, au travers desquelles une importante collecte de données aurait pu être effectuée. Une perspective évidente consiste en un relevé d'informations qui permettraient une configuration plus précise des modèles concernant l'impact de l'utilisation des technologies RFID sur les temps de processus dans la gestion de production et de la distribution de ces produits particuliers.

La prise en compte du contexte dans l'estimation de l'apport de technologies est encore plus importante lorsque celui-ci évolue. Les éventuelles relocalisations et de collaborations concernant le service de pharmacotechnie oncologique de l'Archet, associées à l'augmentation du besoin, explicitent bien cette difficulté. Les résultats concernant l'étude de planification ont soulevé de nombreuses perspectives d'amélioration et de poursuite de l'étude. On peut citer par exemple un point extrêmement précis : le besoin de redéfinir la mesure de la robustesse du système au travers d'une modification du scénario catastrophe, qui inclut une demande trop équilibrée entre les types de produits demandés pour faire ressortir l'intérêt de chercher à avoir un personnel multi-compétent. L'intégration de plusieurs services de production de soins à ce modèle est au contraire une perspective parmi les plus ambitieuses et les plus vagues. Cette élargissement permettrait d'appuyer l'intérêt de développer des systèmes d'assistance à la production. De tels outils peuvent mener à un mode de management innovant, et être appliqués à de nombreux autres systèmes de production.





# Conclusion générale

## Synthèse

Cette thèse se positionne à l'intersection de problèmes très étudiés, qui soulèvent eux-mêmes des questions se révélant pluridisciplinaires : L'amélioration du fonctionnement de services hospitaliers et l'estimation de l'impact des nouvelles technologies. La description du contexte nous a permis de mesurer la difficulté et la nécessité de l'amélioration de la production de soins. Les particularités de l'organisation hospitalière et sanitaire sont notamment dues à une grande part d'aléatoire dans la demande et dans les procédures de la prodigation d'une réponse efficace à cette demande. La gouvernance hospitalière est difficile du fait des indicateurs et objectifs qui peuvent s'avérer concurrentiels. Les réformes récentes et en cours obligent les services de soins à l'application de modifications fonctionnelles et à la recherche d'optimisations des processus et activités. Nous avons montré qu'une piste importante de l'amélioration de l'efficience des services de soins en parallèle à la stabilité du risque, voire sa réduction, est l'utilisation de technologies et méthodes de traçabilité modernes.

Les travaux de recherche présentés dans cette thèse se sont précisément orientés vers les technologies de radio-identification (RFID). Nous avons donc plus précisément présenté ces technologies, et avons cherché à caractériser l'état de leur diffusion dans un contexte général avant de décrire quelques exemples de leur utilisation dans le contexte hospitalier. Ces exemples ont fait ressortir l'intérêt de repenser le fonctionnement d'une partie des systèmes ciblés par l'implémentation des nouvelles technologies de l'information et de la communication en général, et des étiquettes auto-communicantes en particulier.

Ces premières observations nous ont permis de valider la pertinence du projet d'implémentation d'un (ensemble de) pilote(s) auquel nous avons participé. Les objectifs de ce projet étaient la validation de la faisabilité d'utiliser les RFID dans des services particulièrement contraignants pour le bon fonctionnement de ces technologies et l'observation de leur utilisation pour le fonctionnement de ces services.

Dans le second chapitre introductif, nous avons présenté un ensemble d'outils qui permettent de répondre à ces objectifs. Nous y avons premièrement décrit des approches de mesure de la performance utilisées par les hospitaliers et consultants, insistant sur la mesure des risques. Les méthodes observées ont montré une forte spécialisation de ces indicateurs, et que la mesure de la performance doit être adaptée au contexte, au système traité et à ses objectifs. Nous avons ensuite énuméré un ensemble d'outils d'optimisation et d'aide à la décision qui visent à répondre aux problématiques de réorganisation des services concernés par la mise en place de nouvelles technologies. En dernier lieu, nous avons décrit les approches par simulation adaptées à notre



objectif de prospection des variations de performance et d'amélioration de la compréhension du fonctionnement de ces systèmes suivant les décisions prises. Cet état de l'art a fait ressortir le fait qu'aucune méthode n'est à exclure totalement, et que la sélection de l'approche par simulation doit prendre en compte la granularité des éléments observés, l'importance des interactions dans le système et, comme les indicateurs de performance, des scénarios que l'on souhaite observer et évaluer. L'étude concernant les biobanques a été effectuée via l'utilisation du logiciel de simulation à événements discrets Arena. Nous avons présenté un modèle configurable qui considère l'ensemble des processus ayant lieu à l'intérieur d'une tumorothèque. Ce travail nous a mené à la mise en application d'une approche descriptive des processus, qui consiste en la séparation des processus en sous-parties liées entre elles. Le découpage des processus consiste simplement en la séparation des parties informative et de vérification, qui sont les deux activités importantes de la traçabilité et de la maîtrise du risque sanitaire, et qui seront les impactées en priorité par l'utilisation de technologies auto-communicantes. Un tel découpage permet de facilement reconfigurer les paramètres suivant les solutions technologiques, matérielles et logicielles, proposées par les fournisseurs.

Les apports génériques que sont l'amélioration de la qualité et du temps d'inventariage des stocks nous ont poussé à définir et implémenter une activité qui n'est pas pratiquée dans les biobanques partenaires, et à observer son potentiel économique. Cette activité est la concaténation des boîtes de cryotubes ; elle n'est pas pratiquée à cause des risques de dégradation des échantillons vu le temps nécessaire à inventorier les boîtes de cryotubes manuellement ou à l'aide de codes barres.

Le modèle configurable présenté dans cette partie représente une partie non négligeable d'outil d'aide à la décision de l'introduction des RFID dans le fonctionnement interne d'une biobanque. Une interface appropriée permettant à tout responsable de biobanque d'élaborer des plans d'implantation concernant sa structure restant nécessaire à transformer ce modèle en plateforme d'expérimentations ouverte. Le fait que ce modèle ait été développé à l'aide d'un logiciel commercial est cependant pénalisant et limite la génération d'une telle solution à un web-service, ou nécessite de retranscrire l'intégralité du modèle (et une partie du moteur SIMAN) dans un autre langage. Les expérimentations menées ont permis de mesurer l'intérêt d'élaborer une méthode d'étiquetage des banques existantes, la solution proposée au travers du projet-pilote MISTRALS n'étant pas applicable à des cryotubes existants.

Le cas d'étude lié au projet "MISTRALS Chimio" a soulevé de nombreuses pistes d'amélioration du système de prodigation de cytotoxiques. La gestion des stocks de consommables, l'approvisionnement des différentes parties du système, la production, la distribution, l'administration et la traçabilité réglementaire des déchets hospitaliers et éventuellement particuliers, peuvent profiter de l'apport des technologies auto-communicantes. Les apports génériques ont évidemment le potentiel de réduire la charge des ressources, ce qui pourrait faire contrepoids face à l'augmentation des besoins. L'amélioration de la traçabilité et l'implémentation de détrompeurs automatiques permet de réduire les risques.

Nous avons estimé pertinent d'anticiper la création d'un dispositif de détrompeurs irréprochable, et avons par conséquent proposé un mode de gestion des ressources humaines visant une meilleure qualité de formation globale. Notre principal cas d'étude s'est par conséquent focalisé sur une observation des processus de production des cytotoxiques. L'utilisation de la simulation à événements discrets étant la méthode la plus adaptée à l'observation du problème

ainsi défini, nous avons développé un moteur de simulation approprié en C++.

L'approche de gestion de la production proposée nécessitant l'estimation de la compétence des ressources humaines, nous avons adapté un modèle bien connu issu de la littérature pour simuler l'évolution des compétences des ressources humaines. Nous avons observé certaines méthodes d'estimation des compétences, volontairement choisies quelque peu grossières afin de représenter le fait qu'une estimation précise de l'évolution des temps de préparation complexes, comme c'est le cas ici, reste difficile. L'acquisition des données en temps réel, l'un des apports génériques présumés par l'existence d'un détrompeur parfait, permet de re-paramétriser ces modèles tout au long du déroulement des opérations. La prise en compte de la performance évolutive des ressources complexifie le problème d'ordonnancement de la production des chimiothérapies. Les résultats observés ont montré qu'une bonne estimation et anticipation de la performance des manipulateurs permet de maximiser l'acquisition d'expérience et d'équilibrer cette expérience.

De manière générale, cette thèse apporte un ensemble d'explications concernant la complexité d'estimer les impacts de l'introduction des RFID dans le contexte hospitalier. La complexité de l'organisation des systèmes de soins et l'omniprésence de l'action humaine en sont des facteurs importants. La description des approches par simulation a porté notre intérêt vers la simulation à événements discrets vu la granularité de nos sujets d'étude. Les problématiques physiques et interactions entre les services et départements peuvent nécessiter l'utilisation d'autres paradigmes d'observation des systèmes et des effets de l'introduction de ces technologies.

Nous avons proposé une approche de description des processus qui permet de reconfigurer des modèles de simulation afin de précisément caractériser les apports "génériques" de l'utilisation des technologies observées. Ces apports dits "génériques" sont à mettre en opposition avec les bénéfices indirects que l'on peut tirer de l'utilisation des RFID. Nous avons pu, au travers des deux services étudiés, expliciter la nécessité de réfléchir à l'intégration de nouveaux processus et à la réingénierie des systèmes considérés afin de profiter au mieux des apports de l'accès automatisé à une information précise en temps réel. Les modifications organisationnelles découlant des propositions effectuées ont soulevé des problèmes d'optimisation pour lesquels nous avons proposé une approche de résolution.

De nombreuses pistes d'amélioration sont décrites, notamment dans la partie concernant la gestion de la production des chimiothérapies. Nous proposons ici un ensemble de perspectives plus générales.

## **Perspectives**

La difficulté de définir la solution technologique la plus efficiente tient aux faits que :

- Les décisions technologiques doivent être adaptés à l'ensemble des particularités du système étudié.
- Ces choix technologiques doivent idéalement être associés à un travail de réingénierie, qui peut mener à de profondes modifications organisationnelles et à la définition de nouveaux problèmes d'optimisation.
- L'anticipation des apports des systèmes technologiques idéalisés peut pousser le développement des systèmes experts nécessaires à un profit maximal de leur implémentation. Les

techniques de simulation permettent d'estimer la pertinence et d'aider à la définition de ces systèmes experts.

- Les bénéfices tirés de l'implémentation des technologies de communication en général, et des RFID en particulier, peuvent être décuplés par une adoption massive de ces technologies, ce qui passe par la définition d'un ensemble de normes et protocoles. Cette étape peut s'avérer difficile à cause de la légitime apparition de matériels et logiciels propriétaires.
- Les particularités de l'organisation hospitalière que sont l'omniprésence du facteur humain et la précarité de l'équilibre organisationnel impliquent une éventuelle réticence au niveau de l'acceptation de ces changements ; la conduite du changement doit y être traitée avec la plus grande précaution.

Ces différents points nous poussent à encourager l'utilisation de simulations poussées pour anticiper le fonctionnement du système et les modifications induites par l'utilisation des NTIC. Les premier et quatrième points évoqués ci-dessus appuient l'intérêt de l'utilisation de simulations multi-niveau. Cette approche permet en effet de pouvoir intégrer modèle physique (microscopique) concernant les communications sans fil à des approches systémiques (mésoscopiques) qui correspondent aux études que nous avons décrites. Une description très macroscopique étudierait les interactions des services, départements et établissements entre eux, et pourrait même estimer la pertinence de la mise en place de directives (inter)nationales indiquant une adoption massive de technologies. L'élaboration de ces modèles nécessite un ensemble de paramétrages qui ne peuvent être définis uniquement au travers d'une approche théorique. La mise en place de pilotes d'observation doit être considérée, si possible en amont de toute implémentation de grande nature. Concédonc que l'utilisation de tels modèles nécessite un effort de développement et des temps de calcul très importants, et que leur faisabilité en un temps raisonnable reste à démontrer. Certaines études et projets [FuturICT 2009; Sandberg and Bostrom 2008], nous permettent d'espérer que cela sera très prochainement le cas.

Le cas particulier des systèmes à forte composante humaine comporte une complexité supplémentaire concernant toute gestion du changement. Les approches de management adaptées à ces problèmes doivent donc faire partie intégrante des projets de réingénierie en général, et de l'élaboration de la manière d'implémenter au mieux les technologies RFID en particulier. Des difficultés supplémentaires concernent spécialement ces technologies, qui n'ont pour l'instant pas une bonne image aux yeux du grand public et qui peuvent être rejetées par les membres de toute organisation. Des approches sociologiques permettent d'avoir une meilleure visibilité des raisons de cette perception négative [Draetta and Delanoë 2011], et peuvent apporter des pistes de la modification, ou du moins de la gestion des changements organisationnels et de l'accompagnement de projet [Charpentier 2004; Jaujard 2009], qui peut s'avérer compliquée notamment à cause de ce point de vue *a priori*.

L'évolution des techniques et des coûts des technologies communicantes ont ouvert le champ du monitoring et de traitements à domicile de plus en plus sophistiqués. Les problèmes liés à la dispensation de médicaments anticancéreux à domicile sont notamment décrites par [2008]. On peut imaginer approfondir les propositions émises en étudiant les liens entre les tournées de véhicules sujettes à des contraintes de temps (VRPTW), l'ordonnancement de la production, et les effets de l'acquisition d'expérience sur ces deux problèmes [Zhong 2010; Housseman et al.

2010]. L'éventualité de développer la pratique de traitements lourds au domicile du patient soulève des problèmes concernant la création de capteurs physiologiques précis, la calibration des alertes et la localisation des intervenants d'urgence. L'interaction et le partage des ressources entre plusieurs services est évidemment la perspective la plus intéressante de la considération d'utiliser les RFID en tant que détrompeur parfait pour pratiquer la formation continue assistée par système expert. La question de la motivation du personnel hospitalier se pose évidemment, mais la conscience des difficultés liées au manque de ressources, à la variabilité de l'activité et le volontarisme généralement observable du personnel soignant laissent penser que cette perspective sera acceptée.

Cette approche de fonctionnement peut également se voir appliquée à des emplois dans la production et la distribution de biens plus conventionnels. L'essor que connaît l'achat par correspondance et la forte saisonnalité de la consommation poussent en effet les industriels à l'utilisation d'employés intérimaires, qui peuvent être confrontés à fréquemment changer de travail et à acquérir de l'expérience dans de nombreux domaines et environnements.

Les aspects psychologiques et sociologiques ont une place très importante dans la création et l'estimation qualitative d'une solution technologique. Ils le sont d'autant plus dans le cas ci-étudié que les systèmes hospitaliers fonctionnent principalement avec des humains. La réussite d'un projet d'intégration de technologies communicantes proviendra de l'application à communiquer et impliquer les partenaires afin de définir au mieux ses spécificités et les réorganisations engendrées. La résistance à un changement peut effectivement réduire à néant tous les efforts mis en œuvre par l'imposition de changements incompris et non désirés.



# Bibliographie

- [Abad et al. 2009] ABAD, E., PALACIO, F., NUIN, M., DE ZÁRATE, A. G., JUARROS, A., GÓMEZ, J., AND MARCO, S. 2009. Rfid smart tag for traceability and cold chain monitoring of foods : demonstration in an intercontinental fresh fish logistic chain. *Journal of Food Engineering* 93, 4, 394–399.
- [AFGI 1992] AFGI. 1992. *Évaluer pour évoluer, les indicateurs de performance au service du pilotage industriel*. Association Française de Gestion Industrielle. Paris.
- [Ajili 2010] AJILI, S. 2010. Outil d’aide à la décision pour les circuits officinaux de la collecte de dasri. M.S. thesis, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne.
- [Albrecht and McIntyre 2006] ALBRECHT, K. AND MCINTYRE, L. 2006. *Spychips : How Major Corporations and Government Plan to Track Your Every Purchase and Watch Your Every Move*. Plume.
- [Alemdar and Ersoy 2010] ALEMDAR, H. AND ERSOY, C. 2010. Wireless sensor networks for healthcare : A survey. *Computer Networks* 54, 2688–2710.
- [Angeles 2005] ANGELES, R. 2005. Rfid technologies : Supply-chain applications and implementation issues. *Information Systems Management* 22 (1), 51–65.
- [Araboui et al. 2007] ARABOUI, S., CISLO, N., AND SMITH-GUERIN, N. 2007. Home healthcare process : Challenges and open issues. In *Proceedings of the 33rd International Conference on Operational Research Applied to Health Sciences, 15-20 July 2007, Saint-Etienne (France)*. 423–436.
- [Arumugam and Engels 2009] ARUMUGAM, D. AND ENGELS, D. 2009. Specific absorption rates in the human head and shoulder for passive uhf rfid systems. *Int. J. Radio Frequency Identification Technology and Applications* 2, 1, 1–26.
- [Ayache et al. 2009] AYACHE, N., CLATZ, O., DELINGETTE, H., MALANDAIN, G., PENNEC, X., AND SERMESANT, M. 2009. Asclepios : a research project-team at inria for the analysis and simulation of biomedical images. In *From semantics to computer science : essays in honor of Gilles Kahn*, Y. Bertot, G. Huet, J.-J. Lévy, and G. Plotkin, Eds. Cambridge University Press, 415–436.
- [Bacheldor 2006] BACHELDOR, B. 2006. Diabetic device uses rfid to administer insulin. Available via <http://www.rfidjournal.com/article/view/2617>.
- [Bacheldor 2007] BACHELDOR, B. 2007. Kodak’s rfid moment. Available via <http://www.rfidjournal.com/article/view/3100>.
- [Bachelet 2010] BACHELET, R. 2010. Méthodes de résolution de problèmes le diagramme cause-effet. Cours en ligne disponible sur [http://rb.ec Lille.fr/l/Qualite/Qualite\\_Ishikawa.html](http://rb.ec Lille.fr/l/Qualite/Qualite_Ishikawa.html).
- [Baird et al. 2001] BAIRD, D. R., HENRY, M., LIDDELL, K. G., MITCHELL, C. M., AND SNEDDON, J. G. 2001. Post-operative endophthalmitis : the application of hazard analysis critical control points (HACCP) to an infection control problem. *Journal of hospital infection* 49, 1, 14–22.
- [Balin 2007] BALIN, S. 2007. Amélioration de processus de production de services par la simulation. Ph.D. thesis, Université Paris Dauphine.
- [Balin and Giard 2007] BALIN, S. AND GIARD, V. 2007. La qualité des services et leurs processus de production. In *7eme Congrès international de génie industriel, 5-6/06 2007, Trois rivières, Québec (CANADA)*. 1–11.
- [Ballard 2003] BALLARD, D. 2003. System and method of tracking surgical sponges. *U.S. Patent Application Publication No. : US 20030196837 A1*.
- [Bass 1969] BASS, F. M. 1969. A new product growth model for consumer durables. *Management Science* 15, 5, 215–227.
- [Bazin et al. 2010] BAZIN, C., VIEILLARD, V., ASTIER, A., AND PAUL, M. 2010. Contrôle rapide et fiable des préparations de chimiothérapies à base d’anticorps monoclonaux à l’aide de l’automate multispec. *Annales Pharmaceutiques Françaises* 68, 3, 163–177.
- [Bekoune et al. 2009] BEKOUNE, M., MARTELLI, N., PROGNON, P., AND BONAN, B. 2009. Prescription et préparation des anticancéreux en établissement hospitalier : exemples de maîtrise des risques. *Gestions Hospitalières* 482, 33–37.

- [Benini et al. 2006] BENINI, L., FARELLA, E., AND GUIDUCCI, C. 2006. Wireless sensor networks : Enabling technology for ambient intelligence. *Microelectronics Journal* 1, 37, 1639–1649.
- [Berdegué 2005] BERDEGUÉ, J. A. 2005. Les systèmes d'innovation au service des pauvres. Available via [www.ifad.org](http://www.ifad.org).
- [Bertrand and Schlatter 2009] BERTRAND, E. AND SCHLATTER, J. 2009. Rfid dans le secteur de la santé comment réduire les risques ? *Supply Chain Magazine* 31, 76–78.
- [Billaut 2006] BILLAUT, J. 2006. Recherche opérationnelle et génie industriel. In *Journée du Groupement Génie Industriel et de la ROADEF à l'ENSGI-INPG autour de l'apport de la Recherche Opérationnelle en Génie Industriel*.
- [Biskup 1999] BISKUP, D. 1999. Single-machine scheduling with learning considerations. *European Journal of Operational Research* 115, 173–178.
- [Biskup 2008] BISKUP, D. 2008. A state-of-the-art review on scheduling with learning effects. *European Journal of Operational Research* 188, 315–329.
- [Bodenheimer et al. 2002] BODENHEIMER, T., LORIG, K., HOLMAN, H., AND GRUMBACH, K. 2002. Patient self-management of chronic disease in primary care. *Journal of the American Medical Association* 288, 19, 2469–2475.
- [Bonnabry 2007] BONNABRY, P. 2007. How can the labelling and the packaging of drugs impact on the drug safety ? In *Swissmedic, Bern, Suisse*.
- [Bonnabry 2010a] BONNABRY, P. 2010a. Analyse prospective des risques : application de la méthode amdec. Formation FHV de coordinateur "Sécurité des patients", Prilly, 15 septembre 2010.
- [Bonnabry 2010b] BONNABRY, P. 2010b. Intérêts et limites des technologies de l'information dans la sécurisation du circuit du médicament. Available via <http://pharmacie.hug-ge.ch>, last access : 2010.11.22.
- [Bonnabry et al. 2006] BONNABRY, P., CINGRIA, L., ACKERMANN, M., SADEGHIPOUR, F., BIGLER, L., AND MACH, N. 2006. Use of a prospective risk analysis method to improve the safety of the cancer chemotherapy process. *International Journal for Quality in Health Care* 18, 1, 9–16.
- [Bonnabry et al. 2008] BONNABRY, P., DESPONT-GROS, C., GRAUSER, D., CASEZ, P., DESPOND, M., PUGIN, D., RIVARA-MANGEAT, C., KOCH, M., VIAL, M., ITEN, A., AND LOVIS, C. 2008. A risk analysis method to evaluate the impact of a computerized provider order entry system on patient safety. *Journal of the American Medical Informatics Association* 15, 4, 453–460.
- [Borella et al. 2010] BORELLA, L., DUPONT, M., HEBERT, J.-C., JANIN, A., AND LUBIN, R. 2010. Charte éthique des tumorothèques hospitalières. Available via <http://www.e-cancer.fr/> [last access Sept. 23, 2010].
- [Borshchev and Filippov 2004] BORSHCHEV, A. AND FILIPPOV, A. 2004. From system dynamics and discrete event to practical agent based modeling : Reasons, techniques, tools. In *Proceedings of The 22nd International Conference of the System Dynamics Society, July 25- 29, Oxford, England*.
- [Bosse et al. 2009] BOSSE, T., GERRISTEN, C., AND TREUR, J. 2009. Towards integration of biological, psychological and social aspects in agent-based simulation of violent offenders. *SIMULATION* 85, 10, 635–660.
- [Bostan et al. 2007] BOSTAN, S., ACUNER, T., AND YILMAZ, G. 2007. Patient (customer) expectations in hospitals. *Health Policy* 82, 62–70.
- [Bottani et al. 2009] BOTTANI, E., HARDGRAVE, B., AND VOLPI, A. 2009. A methodological approach to the development of rfid supply chain projects. *International Journal of RF Technologies : Research and Applications* 2, 1, 131–150.
- [Boucher et al. 2007] BOUCHER, X., BONJOUR, E., AND GRABOT, B. 2007. Formalization and use of competencies for industrial performance optimization : a survey. *Computers in Industry* 58, 2, 98–117.
- [Bouchriha et al. 2007] BOUCHRIHA, H., JEBALI, A., AND BENZARTI, E. 2007. Toward a decision tool for home care planning. In *Proceedings of the 33rd International Conference on Operational Research Applied to Health Sciences, 15-20 July 2007, Saint-Etienne (France)*. 437–446.
- [Brailsford et al. 2010] BRAILSFORD, S., DESAI, S., AND VIANA, J. 2010. Towards the holy grail : Combining system dynamics and discrete-event simulation in healthcare. In *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference*. 2293–2303.
- [Brailsford et al. 2009] BRAILSFORD, S., HARPER, P., PATEL, B., AND PITT, M. 2009. An analysis of the academic literature on simulation and modelling in health care. *Journal of Simulation* 3, 130–140.
- [Brailsford and Schmidt 2003] BRAILSFORD, S. AND SCHMIDT, B. 2003. Towards incorporating human behavior in models of health care systems : an approach using discrete event simulation. *European Journal of Operational Research* 150, 1, 19–31.
- [Brailsford et al. 2006] BRAILSFORD, S., SYKES, J., AND HARPER, P. 2006. Incorporating human behavior in healthcare models. In *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference*. 466–472.
- [Brailsford and Vissers 2010] BRAILSFORD, S. AND VISSERS, J. 2010. Or in healthcare : A european perspective. *European Journal of Operational Research*.

- [Brailsford 2007] BRAILSFORD, S. C. 2007. Tutorial : Advances and challenges in healthcare simulation modeling. In *Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference*. 1436–1448.
- [British Department of Trade & Industry 2003] BRITISH DEPARTMENT OF TRADE & INDUSTRY. 2003. *Successful solutions in HealthCare FDA proposes new bar code regulation*.
- [Brown and Dell 2006] BROWN, G. G. AND DELL, R. F. 2006. Formulating Integer Linear Programs : A Rogues' Gallery. *INFORMS Transactions on Education* 7, 2.
- [Buettner et al. 2009] BUETTNER, M., PRASAD, R., PHILOPOSE, M., AND WETHERALL, D. 2009. Recognizing daily activities with rfid-based sensors. In *UbiComp 2009, Sep 30 - Oct 3, 2009, Orlando, Florida, USA*.
- [Burnell 2008] BURNELL, J. 2008. Item-level rfid prevents meat spoilage for metro. Available via <http://www.rfidupdate.com/>.
- [Calais 2007] CALAIS, C. 2007. Chu de dijon de grandes ambitions en traçabilité. *Supply Chain Magazine* 12, 34–35.
- [Canada 2010] CANADA, R. 2010. Des hôpitaux financés à la performance. Tech. rep., Available via <http://www.radio-canada.ca> (Last Access : 11.22.2010).
- [Cao and Sun 2009] CAO, Z. AND SUN, Y. 2009. Polymeric n-halamine latex emulsions for use in antimicrobial paints. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2, 1, 494–504.
- [Carter 2002] CARTER, M. 2002. Diagnosis : Mismanagement of resources. *OR/MS Today* 29, 2.
- [Cartier and Forgues 2006] CARTIER, M. AND FORGUES, B. 2006. Intérêts de la simulation pour les sciences de gestion. *Revue Française de gestion* 6, 165, 125–137.
- [Castot et al. 2008] CASTOT, A., HARAMBURU, F., AND KREFT-JAÏS, C. 25 Septembre 2008. Hospitalisations dues aux effets indésirables des médicaments : résultats d'une étude nationale \_ point sur la nouvelle campagne d'information sur les traitements anticoagulants antivitamin k. In *Les rendez-vous presse de l'Agence Française de Sécurité Sanitaire des Produits de Santé (AFSSAPS)*.
- [Cato 2010] CATO. 2010. The software for oncologic therapy planning, therapy monitoring and the preparation of cytotoxics.
- [Chahal and Eldabi 2008] CHAHAL, K. AND EL DABI, T. 2008. System dynamics and discrete event simulation : A meta-comparison. In *Operational Research Society Simulation Workshop (SW08)*. 189–197.
- [Chahed 2008] CHAHED, S. 2008. Modélisation et analyse de l'organisation et du fonctionnement des structures d'hospitalisation à domicile. Ph.D. thesis, École Centrale des Arts et Manufactures.
- [Chahed et al. 2008] CHAHED, S., FEILLET, D., SAHIN, E., AND DALLERY, Y. 2008. Couplage production - distribution des médicaments anticancéreux. In *4eme conférence GISEH (Gestion et Ingénierie des Systèmes Hospitaliers) EPFL-Lausanne, 4-6 septembre 2008*. 685–694.
- [Chahed et al. 2007] CHAHED, S., MARCON, E., SAHIN, E., AND DALLERY, Y. 2007. Home care planning decisions : Bibliography and case study. In *Proceedings of the 33rd International Conference on Operational Research Applied to Health Sciences, 15-20 July 2007, Saint-Etienne (France)*. 409–422.
- [Chahed et al. 2004] CHAHED, S., SAHIN, E., AND DALLERY, Y. 2004. L'hospitalisation à domicile : quel(s) intérêt(s) et quelle(s) organisation(s) ? In *Actes de la 2ème Conférence Francophone en Gestion et Ingénierie des Systèmes Hospitaliers, FUCAM, Mons, Belgique*.
- [Chan et al. 2009] CHAN, M., CAMPO, E., ESTEVE, D., AND FOURNIOLS, J. 2009. *Smart Homes - Current Features and Future perspectives*. LAAS-CNRS, Ave du Colonel Roche, 31077 Toulouse Cedex 4, France.
- [Charpentier 2004] CHARPENTIER, P. 2004. La gestion du changement dans les organisations. *Comprendre le management* 321, 29–36.
- [Chen et al. 2000] CHEN, F., DREZNER, Z., RYAN, J. K., AND SIMCHI-LEVI, D. 2000. Quantifying the bullwhip effect in a simple supply chain : The impact of forecasting, lead times, and information. *Management Science* 46, 3, 436–443.
- [Clancy 2004] CLANCY, T. 2004. Medication error prevention. progress of initiatives. *JONAS Healthc Law Ethics Regul.* 6, 3–12.
- [Collomp 2008] COLLOMP, R. 2008. Pilotage de la performance du circuit du médicament au travers du management des risques iatrogènes. Ph.D. thesis, École des Mines de Paris.
- [Collomp 2009] COLLOMP, R. 2009. Communication privée.
- [Collomp et al. 2010] COLLOMP, R., CHALINDAR, P., HOUSSEMAN, S., DELANOE, A., CRIDELICH, C., DANTIN, T., BE-RARD, O., MULLER, F., POITRAT, S., SOCCOJA, G., PRIEUR, G., ABSI, N., DRAETTA, L., AND MALLEA., P. 2010. Traçabilité et déchets d'activités de soins à risque infectieux (dasri) : Evaluation de l'apport de la technologie rfid. In *Conférence GISEH 2010, 2-4 Septembre 2010, Clermont Ferrand, France*.
- [Collomp et al. 2007] COLLOMP, R., GAZIELLO, M., LAPEYRE, B., AND MIRFENDERSKI, N. 2007. Mistrals pharma wp4 : Cahier des charges. Tech. rep., Centre Hospitalier Universitaire de Nice.



- [COMPAQH 2003] COMPAQH. 2003. Coordination pour la mesure de la performance et l'amélioration de la qualité hospitalière. Plusieurs publications et informations disponibles sur le site officiel : <http://ifr69.vjf.inserm.fr/compagh/>.
- [ContractorUK 2005] CONTRACTORUK. 2005. Rfid enables wallet. Available via <http://www.contractoruk.com/>.
- [Dalton et al. 2008] DALTON, G. D., SAMAROPOULOS, X. F., AND DALTON, A. C. 2008. Improvements in the safety of patient care can help end the medical malpractice crisis in the united states. *Health Policy* 86, 153–162.
- [De MarcellisWarin 2005] DE MARCELLISWARIN, N. 2005. Analyse des incidents - accidents liés aux soins au Québec : le modèle Recuperare-Santé. *Risques et qualité en milieu de soins* 3, 145–153.
- [DeMarco et al. 2009] DEMARCO, D., KOVELA, S., SMITH, L., VERELLA, J., LEARMONTH, G., AND PATEK, S. 2009. Agent-based simulation model for predicting adoption rates of electronic medical records. In *Systems and Information Engineering Design Symposium, 2009. SIEDS '09*. 7–12.
- [Desroches 2005] DESROCHES, A. 2005. Le rex en question, pourquoi et comment. In *Présentation 4ème Congrès AFGRIS, Octobre 2005*.
- [Direction Générale de la Santé 2008] DIRECTION GÉNÉRALE DE LA SANTÉ. 2008. Des états généraux pour résoudre la question des déserts médicaux. Available via <http://www.sante-sports.gouv.fr/>.
- [Direction Générale de la Santé 2010] DIRECTION GÉNÉRALE DE LA SANTÉ. 2010. Dossier médical personnel. Available via <http://www.sante-sports.gouv.fr/>.
- [discoverRFID 2010] DISCOVERRFID. 2010. Un glacier utilise la rfid. Available via <http://www.discoverrfid.org/>.
- [Draetta and Delanoë 2011] DRAETTA, L. AND DELANOË, A. 2011. *RFID, une technologie controversée. Ethnographie de la construction sociale du risque*. HERMES Science Publications (à paraître).
- [e cancer.fr 2007] E CANCER.FR. 2007. <http://www.e-cancer.fr/> [accessed october 30, 2009].
- [Eder et al. 2009] EDER, J., DABRINGER, C., SCHICHO, M., AND STARK, K. 2009. Information Systems for Federated Biobanks. *Transactions on Large-Scale Data and Knowledge-Centered Systems* 5740, 156–190.
- [Efe et al. 2009] EFE, K., RAGHAVAN, V., AND CHOUBEY, S. 2009. Simulation modeling movable hospital assets managed with rfid sensors. In *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (WSC), 13-16 Dec. 2009 Austin (Tx), USA*. 2054 – 2064.
- [EGE 2002] EGE. 2002. Ethical aspects of ict implants in the human body. Tech. Rep. No. 20, European Group on Ethics and New Technologies, [http://ec.europa.eu/european\\_group\\_ethics/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/european_group_ethics/index_en.htm).
- [El Yousfi 2010] EL YOUSFI, J. 2010. Outil d'aide à la décision pour la logistique des processus hospitaliers des chimiothérapies. M.S. thesis, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne.
- [Elmaghraby 1990] ELMAGHRABY, S. 1990. Economic manufacturing quantities under conditions of learning and forgetting. *Production Planning Control* 1, 196–208.
- [Emmett J. Lodree et al. 2009] EMMETT J. LODREE, J., GEIGER, C. D., AND JIANG, X. 2009. Taxonomy for integrating scheduling theory and human factors : Review and reseach opportunities. *International Journal of Industrial Ergonomics* 39, 39–51.
- [EPCGlobalInc 2007] EPCGLOBALINC. 2007. Tag class definitions. [http://www.epcglobalinc.org/standards/TagClassDefinitions\\_1\\_0-whitepaper-20071101.pdf](http://www.epcglobalinc.org/standards/TagClassDefinitions_1_0-whitepaper-20071101.pdf).
- [EuroPharmat 2007] EUROPHARMAT. 2007. Guide traçabilité des dispositifs médicaux. Tech. rep., avec la collaboration de l'AFSSAPS.
- [Fédération Hospitalière de France 2010] FÉDÉRATION HOSPITALIÈRE DE FRANCE. 2010. Rapport 2010 au parlement sur la tarification à l'activité (t2a). Tech. rep., Ministère de la Santé et des Sports.
- [Fenn and Raskino 2008] FENN, J. AND RASKINO, M. 2008. *Mastering the hype cycle : how to choose the right innovation at the right time*. Harvard Business Press.
- [Ferber 1995] FERBER, J. 1995. *Les systèmes multi-agents. Vers une intelligence collective*. InterEditions, Paris.
- [Fillon 2010] FILLON, F. 2010. Décret num. 2010-1229 du 19 octobre 2010 relatif à la télémedecine. Available via [www.legifrance.gouv.fr](http://www.legifrance.gouv.fr).
- [Fishwick 1997] FISHWICK, P. A. 1997. Computer simulation : Growth through extension. *Transactions of the Society for the Computer Simulations International* 14, 1, 13–23.
- [Food and Drug Administration 2010] FOOD AND DRUG ADMINISTRATION. 2010. Radiation-emitting products \_ radiofrequency identification (rfid). Available via <http://www.fda.gov/>.
- [Fries 1976] FRIES, B. 1976. Bibliography of operation research in health-care systems. *Operations Research* 24, 801–804.
- [FuturICT 2009] FUTURICT. 2009. Unleashing the power of information for a sustainable future. Via <http://www.futurict.ethz.ch/FuturICT>.

- [Garfinkel 2005] GARFINKEL, M. 2005. Minimizing multi-zone orders in the correlated storage assignment problem. Ph.D. thesis, Georgia Institute of Technology.
- [Garnerin et al. 2007] GARNERIN, P., PELLET-MEIER, B., CHOPARD, P., PERGENER, T., AND BONNABRY, P. 2007. Measuring human-error probabilities in drug preparation : a pilot study. *Eur J. Clin Pharmacol* 63, 769–776.
- [Gaud et al. 2008] GAUD, N., GALLAND, S., AND KOUKAM, A. 2008. Towards a multilevel simulation approach based on holonic multiagent systems. In *10th International Conference on Computer Modelling and Simulation (EUROSIM/UKSiM'08)*. 180–185.
- [Gaukler 2005] GAUKLER, G. M. 2005. Rfid in supply chain management. Ph.D. thesis, Stanford University, California.
- [Gee et al. 2010] GEE, J., BUTTON, M., AND BROOKS, G. 2010. *The financial cost of Healthcare fraud*.
- [Gee et al. 2009] GEE, J., BUTTON, M., BROOKS, G., AND VINCKE, P. 2009. The financial cost of healthcare fraud. Tech. rep., European Healthcare Fraud and Corruption Network.
- [G.F.Kalsdorf 2006] G.F.KALSDORF, C. 2006. Clinical supply chain simulation. Ph.D. thesis, Karlsruhe University of Applied Sciences.
- [Globerson et al. 1989] GLOBERSON, S., LEVIN, N., AND SHTUB, A. 1989. The impacts of breaks on forgetting when performing a repetitive task. *IIE Transactions* 21, 376–381.
- [gomaro.ch 2006] GOMARO.CH. 2006. Historique du code barres. <http://www.gomaro.ch/historiqueducodebarres.htm>.
- [Graham et al. 1979] GRAHAM, R. L., LAWLER, E. L., LENSTRA, J. K., AND RINNOY KAN, A. H. 1979. Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling : a survey. *Annals of Discrete Mathematics* 5, 289–326.
- [Greenleaf 2010] GREENLEAF, G. 2010. India's national id system : Danger grows in a privacy vacuum. *Computer law & Security Review* 26, 479–491.
- [GregLomow and Baezner 2008] GREGLOMOW AND BAEZNER, D. 2008. A tutorial introduction to object-oriented simulation and Sim++. In *Proceedings of the 1991 Winter Simulation Conference, Lausanne, Suisse*, pp 167-174.
- [Griffith et al. 2005] GRIFFITH, C., OBEE, P., AND COOPER, R. 2005. The clinical application of hazard analysis critical control points (HACCP). *American Journal of Infection Control* 33, 5, e39.
- [Grouzmann et al. 2006] GROUZMANN, M.-C., PODILSKY, G., AND PANNATIER, A. 2006. Sécurisation du processus "chimiothérapie" : Expérience d'un hôpital universitaire. In *13ème JFSPH, 16-17.03.2006, Chalon s/ Saône, France*. 1–1.
- [GS1 2009] GS1. 2009. Introduction to gs1 datamatrix. <http://www.gs1.org/>.
- [Haguenoer 2010] HAGUENOER, J.-M. 2010. Les résidus de médicaments présentent-ils un risque pour la santé publique ? *Environnement et Santé publique*.
- [Hall 2004] HALL, B. H. 2004. Innovation and diffusion. NBER Working Paper 10212, University of California-Berkeley.
- [HCAAM 2007] HCAAM. 2007. Rapport du haut conseil pour l'avenir de l'assurance maladie. Tech. rep., Haut Conseil pour l'Avenir de l'Assurance Maladie.
- [Henriksen 2008] HENRIKSEN, J. 2008. Taming the complexity dragon. *Journal of Simulation* 2, 3–7.
- [Hill 1993] HILL, D. R. 1993. *Analyse orientée objet & modélisation par simulation*. Addison-Wesley.
- [Hlaioittinun et al. 2009] HLAOITTINUN, O., BONJOUR, E., AND DULMET, M. 2009. Affectation multi-périodes de tâches de conception en fonction de l'évolution des compétences. In *8ème Congrès International de Génie Industriel - Interopérabilité et Intégration, CIGI'09, Bagnères-de-Bigorre : France*.
- [Hofman et al. 2010] HOFMAN, V., BONNETAUD, C., GAZIELLO, M., ILIE, M., LASSALLE, S., BUTORI, C., LERDA, N., SELVA, E., GAVRIC-TANGA, V., CASTILLO, L., GUEVARA, N., SANTINI, J., POP, D., VÉNISSAC, N., MOURoux, J., CHABANNON, C., AND HOFMAN, P. 2010. The nice chu biobank experience to collect patients' informed consent for research context (2004-2009). *Annales de la pathologie* 30, 337–343.
- [Hohberger and Tsirlin 2009] HOHBERGER, C. P. AND TSIRLINE, Y. 2009. Design of a 13,56mhz segmented helmholtz coil for rf exposure testing of biologics to simulated rfid readers. *Int. J. Radio Frequency Identification Technology and Applications* 2, 1/2, 65–92.
- [Holmqvist and Stefansson 2006] HOLMQVIST, M. AND STEFANSSON, G. 2006. Mobile rfid : A case from volvo on innovation in scm. *Journal of Business Logistics* 27, 2, 251–272.
- [Honnorat 2008] HONNORAT, C. 2008. Apprentissage de l'exercice médical Le malade et sa maladie Le dossier médical. Available via <http://medapod.univ-rennes1.fr>.
- [Housseman et al. 2010] HOUSSEMAN, S., ABSI, N., COLLOMP, R., AND FEILLET, D. 2010. Utilisation de l'auto-identification pour la génération d'ordonnancements intégrant une approche de gestion des compétences : Cas de la production de chimiothérapies. In *Conférence GISEH 2010, 2-4 Septembre 2010, Clermont Ferrand, France*.
- [Housseman et al. 2011] HOUSSEMAN, S., ABSI, N., DAUZÈRE-PÉRÈS, S., AND FEILLET, D. 2011. "impacts of radio-identification on cryo-conservation centers". *Transactions On Modeling And Computer Simulation (TOMACS)* 21, 4.

- [Housseman et al. 2008] HOUSSEMAN, S., ABSI, N., DAUZÈRE-PÉRÈS, S., FEILLET, D., CHABANNON, C., COLLOMP, R., MALLEA, P., AND MIRFENDERSKI, N. 2008. Estimating the impact of rfid technologies in healthcare applications : Perspectives using simulation. In *Twenty Ninth International Conference on Information Systems, Paris 2008*.
- [Howard et al. 2005] HOWARD, D. H., MELTZER, D., KOLLMAN, C., MAIERS, M., LOGAN, B., GRAGERT, L., SETTERHOLM, M., AND HOROWITZ, M. M. 2005. *Optimal Size of a National Cord Blood Bank*. [http://www.sph.emory.edu/dh-howar/cordblood\\_05162005.pdf](http://www.sph.emory.edu/dh-howar/cordblood_05162005.pdf).
- [Hut and Nguyen 2010] HUT, F. AND NGUYEN, T. M. L. 2010. Modèle d'allocation des coûts d'un quartier opératoire en tant que vecteur de changement. In *Gestion et Ingénierie des Systèmes Hospitaliers (GISEH) 2010, 2-4 sept., Clermont Ferrand*.
- [ICSI 2008] ICSI. 2008. Guide des bonnes pratiques du retour d'expérience (rex). Available via <http://www.icsi-eu.org/>.
- [IMPACT 2006] IMPACT. 2006. Counterfeit medicines : an update on estimates - 15 november 2006. Available via <http://www.who.int/> [accessed July 22, 2010].
- [INSEE 2008] INSEE. 2008. Liste des graphiques, des cartes et des tableaux. Tech. rep., Institut national de la statistique et des études économiques.
- [INSEE 2009] INSEE. 2009. Espérance de vie en bonne santé. Tech. rep., Institut national de la statistique et des études économiques.
- [Institute of Industrial Engineers 2011] INSTITUTE OF INDUSTRIAL ENGINEERS. 2011. Definition of industrial engineering. Available via <http://www.iienet2.org/Details.aspx?id=282>.
- [IRDES 2009] IRDES. 2009. L'hôpital : Séjours hospitaliers. Available via <http://www.irdes.fr>.
- [Isaac et al. 2010] ISAAC, T., ZASLAVSKY, A., CLEARY, P., AND LANDON, B. 2010. The relationship between patients' perception of care and measures of hospital quality and safety. *Health Services Research* 45, 4, 1024–1040.
- [Isern et al. 2010] ISERN, D., SANCHEZ, D., AND MORENO, A. 2010. Agents applied in health care : A review. *International Journal of Medical Informatics* 79, 145–166.
- [Jaber and Kher 2002] JABER, M. AND KHER, H. 2002. The dual-phase learning-forgetting model. *International Journal of Production Economics* 73, 3, 229–242.
- [Jaber and Sikström 2004] JABER, M. AND SIKSTRÖM, S. 2004. A numerical comparison of three potential learning and forgetting models. *Int. J. Production Economics* 92, 281–294.
- [Jaber and Bonney 1996] JABER, M. Y. AND BONNEY, M. 1996. Production breaks and the learning curve : The forgetting phenomenon. *Appl. Math. Modelling* 20, 162–169.
- [Jaber and Bonney 1997] JABER, M. Y. AND BONNEY, M. 1997. A comparative study of learning curves with forgetting. *Appl. Math. Modelling* 21, 523–531.
- [Jaujard 2009] JAUJARD, F. 2009. Gestion d'équipes et relations humaines. Cours dispensé aux élèves-ingénieurs en dernière année à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.
- [Jiang et al. 2005] JIANG, M., FU, P., CHEN, H., CHEN, M., XING, B., , SUN, Z., DENG, P., WANG, G., XU, Y., AND WANG, Y. 2005. A dynamic blood information management system based on rfid. In *Proceedings of the 2005 IEEE Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference Shanghai, China, September 1-4, 2005*. 546–548.
- [Jingkun et al. 2010] JINGKUN, L., GUIZHI, X., MINCHAI, H., AND LIJUAN, L. 2010. Application of wireless energy transfer based on bci to the power system of intelligent wheelchair. In *2010 International Conference on Networking and Digital Society*. 35–38.
- [Jun et al. 1999] JUN, J., JACOBSON, S., AND SWISHER, J. 1999. Application of discrete-event simulation in health care clinics : A survey. *Journal of the Operational Research Society* 50, 109–123.
- [Kahol et al. 2009] KAHOL, K., VANKIPURAM, M., AND SMITH, M. 2009. Cognitive simulators for medical education and training. *Journal of Biomedical Informatics* 42, 593–604.
- [Kaiser et al. 1996] KAISER, C. W., FRIEDMAN, S., SPURLING, K. P., SLOWICK, T., AND KAISER, H. A. 1996. The retained surgical sponge. *Annals of Surgery* 224, 1, 79–84.
- [Kang and Koh 2002] KANG, Y. AND KOH, R. 2002. Applications research. Tech. rep., MIT Auto-ID Center.
- [Kapa et al. 2011] KAPA, S., PIERCE, T., HAYES, D. L., JR., D. R. H., AND ASIRVATHAN, S. J. 2011. Electromagnetic interference of magnetic field based auto identification technologies in healthcare settings. *Int. J. Med. Inform.*
- [Katz and Rice 2009] KATZ, J. E. AND RICE, R. E. 2009. Public views of mobile medical devices and services : A us national survey of consumer sentiments towards rfid healthcare technology. *International journal of medical informatics* 78, 104–114.
- [Kelton et al. 2007] KELTON, W. D., SADOWSKI, R. P., AND STURROCK, D. T. 2007. *Simulation with Arena*, 4th ed. McGraw-Hill, Inc, New York.

- [Kergosien 2010] KERGOSIEN, Y. 2010. Algorithmes de tournées de véhicules pour l'optimisation des flux de produits et de patients dans un complexe hospitalier. Ph.D. thesis, Université François Rabelais de Tours.
- [Kergosien et al. 2010] KERGOSIEN, Y., TOURNAMILLE, J.-F., JAULIN, P., LAURENCE, B., YUAN, J., AND BILLAUT, J.-C. 2010. Planification et traçabilité de la production de chimiothérapies anticancéreuses : mise en place d'une solution intégrée performante. In *Gestions et Ingénierie des Systèmes Hospitaliers (GISEH)*, 2-4 Sept. 2010 - Clermont-Ferrand (France).
- [K.H. et al. 2006] K.H., D., GATES, W., AND JOHN, E. 2006. A hybrid approach to the valuation of rfid/mems technology applied to ordnance inventory. *International Journal of Production Economics* 103, 2, 726–774.
- [Kleijnen 2005] KLEIJNEN, J. 2005. Supply chain simulation tools and techniques : a survey. 1, 1.
- [Kleist et al. 2005] KLEIST, R. A., CHAPMAN, T. A., SAKAI, D. A., AND JARVIS, B. S. 2005. *RFID Labeling*, 2nd edition. Printronix.
- [Kohn et al. 2000] KOHN, L., CORRIGEN, J., AND DONALDSON, M. 2000. To err is human. building a safer health system. In *The National Academies Press, Washington DC, USA*.
- [Koutkias et al. 2005] KOUTKIAS, V. G., CHOUVARDA, I., AND MAGLAVERAS, N. 2005. A multiagent system enhancing home-care health services for chronic disease management. *IEEE TRANSACTIONS ON INFORMATION TECHNOLOGY IN BIOMEDICINE* 9, 4, 528–538.
- [Kruk and Freedman 2008] KRUK, M. E. AND FREEDMAN, L. P. 2008. Assessing health system performance in developing countries : a review of the literature. *Health policy (Amsterdam, Netherlands)* 85, 3 (Mar.), 263–76.
- [Kubota 2007] KUBOTA, N. 2007. Human detection and gesture recognition based on ambient intelligence. *Face Recognition*, 261–274.
- [Kuljis and Paul 2007] KULJIS, J. AND PAUL, R. J. 2007. Quantitative modelling in the management of healthcare : Healthcare distinctiveness and singularities. In *Fifth IMS International Conference on Quantitative Modelling in the Management of Healthcare*. Available via [http://www2.wmin.ac.uk/hscmg/qmmhealth2007/talks/Paul\\_R.IMAHealth2007.pdf](http://www2.wmin.ac.uk/hscmg/qmmhealth2007/talks/Paul_R.IMAHealth2007.pdf).
- [Kuljis et al. 2007] KULJIS, J., PAUL, R. J., AND STERGIOULAS, L. K. 2007. Can health care benefit from modeling and simulation methods in the same way as business and manufacturing has ? In *Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference*. 1449–1453.
- [Lacherez et al. 2007] LACHEREZ, P., SEAH, E. L., AND SANDERSON, P. 2007. Overlapping Melodic Alarms Are Almost Indiscriminable. *Human Factors* 49, 4, 637–645.
- [Laffitte 2010] LAFFITTE, W. L. 2010. Read on metal (rom) tagging challenge. Proceeding of the 2010 Alien Conference, available via <http://www.slideshare.net/DennisKhoo/2010-alien-conference-wayne-laffitte-the-rfid-rom-tagging-challenge>.
- [Lakafosis et al. 2010] LAKAFOSIS, V., RIDA, A., VYAS, R., YANG, L., NIKOLAOU, S., AND TENTZERIS, M. 2010. Progress towards the first wireless sensor networks consisting of inkjet-printed, paper-based rfid-enabled sensor tags. In *Proceedings of the IEEE vol.98, No.9, September 2010*. 1601–1609.
- [Landt and Catlin 2001] LANDT, J. AND CATLIN, B. 2001. Shrouds of time \_ the history of rfid. An Association for Automatic Identification and Data Capture Technologies - AIM Publication. Available via <http://www.aimglobal.org>.
- [Law and Kelton 2000a] LAW, A. AND KELTON, W. 2000a. *Simulation Modeling and Analysis*. Mc Graw Series in industrial engineering and management science.
- [Law 2009] LAW, A. M. 2009. How to build valid and credible simulation models. In *Winter Simulation Conference - WSC 2009*, M. Rossetti, R. Hill, B. Johansson, A. Dunkin, and I. R.G., Eds. Vol. 37. 24–33.
- [Law and Kelton 2000b] LAW, A. M. AND KELTON, W. D. 2000b. *Simulation Modeling & Analysis*, 3rd ed. McGraw-Hill, Inc, New York.
- [Lawler 1977] LAWLER, E. 1977. A "pseudopolynomial" algorithm for sequencing jobs to minimize total tardiness. *Ann. of Discrete Math.* 1, 331–342.
- [Lebon 2009] LEBON, C. 2009. Sécurisation du circuit des ancillaires orthopédiques au centre hospitalier universitaire d'ambroise pare. M.S. thesis, Université Paris Descartes.
- [Lee et al. 2004] LEE, Y., CHENG, F., AND LEUNG, Y. T. 2004. Exploring the impact of rfid on supply chain dynamics. In *Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference*. Vol. 2. 1145–1152.
- [LegiFrance 2007] LEGIFRANCE. 2007. Journal officiel n. 64 du 16 mars 2007 page 4950. Available via <http://www.edipharm.org>.
- [Lejeune 2001] LEJEUNE, P. 2001. Mesurer le production de soins hospitaliers. *L'hôpital belge* 2, 245.
- [Leung et al. 2006] LEUNG, Y. T., CHENG, F., LEE, Y. M., , AND HENNESSY, J. J. 2006. A tool set for exploring the value of rfid in a supply chain. Tech. rep., IBM.
- [Lin et al. 2011] LIN, Y., PFUND, M., AND FOWLER, J. 2011. Heuristics for minimizing regular performance measures in unrelated parallel machine scheduling problems. *Computers & Operational Research* 38, 901–916.

- [Lowery 1996] LOWERY, J. C. 1996. Introduction to Simulation in Health Care. In *Winter Simulation Conference*, J. Charnes, D. Morrice, D. Brunner, and J. Swain, Eds. 78–84.
- [Lucas 2010] LUCAS, J. 2010. Dématérialisation des documents médicaux : Créer la confiance pour favoriser l’informatisation. Available via <http://esante.gouv.fr/>.
- [MainTag 2008] MAINTAG. 2008. Rfid x/y matrix scanner. Available via <http://www.maintag.fr/> [accessed November 4<sup>th</sup>, 2010].
- [Marcellis-Warin 2003] MARCELLIS-WARIN, N. D. 2003. Les risques hospitaliers. *La lettre des cyndiniques* 40.
- [Mazier et al. 2010] MAZIER, A., BILLAUT, J.-C., AND TOURNAMILLE, J.-F. 2010. Scheduling preparation of doses for a chemotherapy service. *Annals of Operations Research* 178, 145–154.
- [Meade and Islam 2006] MEADE, N. AND ISLAM, T. 2006. Modelling and forecasting the diffusion of innovation a 25 year review. *International Journal of Forecasting* 22, 519–545.
- [Meiller and Bureau 2009] MEILLER, Y. AND BUREAU, S. 2009. Logistics projects : How to assess the right system ? the case of rfid solutions in healthcare. In *Proceedings of the Fifteenth Americas Conference on Information Systems, San Francisco, California August 6th-9th 2009*. (13).
- [Meyer et al. 2009] MEYER, G. G., FRÄMLING, K., AND HOLMSTRÖM, J. 2009. Intelligent products : A survey. *Computers in Industry* 60, 3, 137–148.
- [Michel et al. 2003] MICHEL, P., QUENON, J., DE SARASQUETA, A., AND SCEMAMA, O. 2003. L’estimation du risque iatrogène grave dans les établissements de santé en france. In *DREES, Etudes et Resultats*. Vol. 219. 1–8.
- [Microsoft 2009] MICROSOFT. 2009. Tag. <http://tag.microsoft.com/>.
- [Minvielle et al. 2007] MINVIELLE, E., SICOTTE, C., CHAMPAGNE, F., CONTANDRIOPOULOS, A.-P., JEANTET, M., PRÉAUBERT, N., BOURDIL, A., AND RICHARD, C. 2007. Hospital performance : Competing or shared values ? 87, 8–19.
- [Mirfenderski 2009] MIRFENDERSKI, N. 2009. Communication privée. Présentation du logiciel CHIMIO.
- [Mönch 2008] MÖNCH, L. 2008. Heuristics to minimize total weighted tardiness of jobs on unrelated parallel machines. In *4th IEEE Conference on Automation Science and Engineering, Washington DC, USA*. 572–577.
- [Montreuil et al. 2005] MONTREUIL, B., HARKIMI, D., LECLERC, P.-A., AND RUIZ, A. 2005. Plateforme de pilotage, de simulation et de monitoring de magasins de détail permettant d’étudier l’impact des technologies rfid sur leur performance. In *6e Congrès international de génie industriel, 7-10 juin 2005, Besançon (France)*.
- [Mosheiov and Sidney 2003] MOSHEIOV, G. AND SIDNEY, J. 2003. Scheduling with general job-dependant learning curves. *European Journal of Operational Research* 147, 665–670.
- [Namatame et al. 2009] NAMATAME, A., MORITA, H., AND MATSUYAMA, K. 2009. Agent-based modeling for the study of diffusion dynamics. In *SpringSim*.
- [Nealon and Moreno 2003] NEALON, J. AND MORENO, A. 2003. Agent-based applications in health care.
- [Nembhard 2001] NEMBARD, D. A. 2001. An empirical comparison of forgetting models. *IEEE Transactions on Engineering Management* 48, 3, 283–291.
- [Neulier et al. 2008] NEULIER, C., DAUCHOT, J., AND MERY, D. 2008. Technologie rfid : Un temps de lecture incompatible avec une utilisation en pratique quotidienne ? Journées EuroPharmat Bordeaux 2008 (Poster).
- [Osmani et al. 2008] OSMANI, V., BALASUBRAMANIAM, S., AND BOTVICH, D. 2008. Human activity recognition in pervasive health-care : Supporting efficient remote collaboration. *Journal of Network and Computer Applications* 31, 628–655.
- [Paré et al. 2007] PARÉ, G., JAANA, M., AND SICOTTE, C. 2007. Systematic review of home telemonitoring for chronic diseases : The evidence base. *J Am Med Inform Assoc*. 14, 3, 269–277.
- [Paranjape and Gill 2010] PARANJAPE, R. AND GILL, S. 2010. Agent-based simulation of healthcare for type ii diabetes. In *Proceedings of the Second International Conference on Advances in System Simulation*. 22–27.
- [Park and Lee 2007] PARK, K. AND LEE, J. 2007. A new method for estimating human error probabilities : Ahp slim. In *Reliability Engineering & System Safety, Vol. 93 (4), pp 578-587*.
- [Parlement Européen 2008] PARLEMENT EUROPÉEN. 2008. Règlement (ce) no 998/2003 du parlement européen et du conseil du 26 mai 2003 concernant les conditions de police sanitaire applicables aux mouvements non commerciaux d’animaux de compagnie, et modifiant la directive 92/65/cee du conseil. Available via <http://eur-lex.europa.eu>.
- [Parsons 1951] PARSONS, T. 1951. *The social system*.
- [Peju et al. 2005] PEJU, N., HUMBERTJEAN, M., AND ROCQUET, S. 2005. Enquête d’opinion auprès des praticiens hospitaliers. [http://fhf.fr/file.php?dos\\_article&at=id\\_article&px=fic1&id=1566](http://fhf.fr/file.php?dos_article&at=id_article&px=fic1&id=1566).
- [PhysicalMarkupLanguage 2002] PHYSICALMARKUPLANGUAGE. 2002. <http://web.mit.edu/mecheng/pml/index.htm>.
- [Potocnjak-Vaillant 2009] POTOENJAK-VAILLANT, A. 2009. Infections nosocomiales : une "liste noire" en "décalage avec la réalité". *Le Monde*.



- [Prades 2008] PRADES, N. 2008. *Lexique du Marketing*, 3rd ed. Editions Bréal.
- [Progress 2008] PROGRESS. 2008. Masaryk memorial cancer institute. Available via [http://www.progress.com/progress\\_software/worldwide\\_sites/cz/docs/mou\\_cs\\_en.pdf#search=%22Masaryk%22](http://www.progress.com/progress_software/worldwide_sites/cz/docs/mou_cs_en.pdf#search=%22Masaryk%22).
- [Proos et al. 2008] PROOS, E. R., PRESCOTT, J. H., AND STAPLES, M. A. 2008. Long-term stability and *in vitro* release of hpth(1-34) from a multi-reservoir array. *Pharmaceutical research* 25, 6.
- [Qtrac 2006] QTRAC. 2006. Instant epc hotspot. Website : [http://www.qtrac.com/Solutions\\_Hotspot.asp](http://www.qtrac.com/Solutions_Hotspot.asp).
- [Quinn and Rohrbaugh 1983] QUINN, R. E. AND ROHRBAUGH, J. 1983. A spatial model of effectiveness criteria : Towards a competing values approach to organizational analysis. *Management Science* 29, 3, 363–377.
- [Radisavljevic et al. 2011] RADISAVLJEVIC, B., RADENOVIC, A., BRIVIO, J., GIACOMETTI, V., AND KIS, A. 2011. Single-layer mos2 transistors. *Nature Nanotechnology* (doi :10.1038).
- [Rais and Viana 2010] RAIS, A. AND VIANA, A. 2010. Operations research in healthcare : a survey. *Intl. Trans. in Op. Res.* 18, 1–31.
- [Rasmussen 1997] RASMUSSEN, J. 1997. Risk management in a dynamic society : A modeling problem. *Safety Science* 27, 2/3, 183–213.
- [Rauner et al. 2004] RAUNER, M. S., HEIDENBERGER, K., AND PESENDORFER, E.-M. 2004. Using a markov model to evaluate the cost-effectiveness of diabetic foot prevention strategies in austria. In *Proceedings of the Western Multiconference, International Conference on Health Sciences Simulation, January 18-22, 2004, San Diego, California, USA, The Society of Computer Simulation International, San Diego, USA*. 63–68.
- [Rauner and Schaffhauser-Linzatti 2002] RAUNER, M. S. AND SCHAFFHAUSER-LINZATTI, M.-M. 2002. Impact of the new austrian inpatient payment strategy on hospital behavior : a system-dynamics model. *Socio-Economic Planning Sciences* 36, 3, 161–182.
- [Reason 2000] REASON, J. 2000. Human errors : Models and management. 320, 768–770.
- [Rekik 2006] REKIK, Y. 2006. The impact of the rfid technology in improving performance of inventory systems subject to inaccuracies. Ph.D. thesis, Ecole Centrale Paris.
- [Reyt et al. 2010] REYT, P.-E., MAZIER, A., AND XIE, X. 2010. Les méthodes de recherche opérationnelle en santé : Applications aux problèmes d’affectation et d’admissions. In *Gestions et Ingénierie des Systèmes Hospitaliers (GISEH), 2-4 Sept. 2010 - Clermont-Ferrand (France)*.
- [Ritter and Schooler 2001] RITTER, F. AND SCHOOLER, L. 2001. The learning curve. *International encyclopedia of the social and behavioral sciences*, 8602–8605.
- [Rogers et al. 2007] ROGERS, A., JONES, E., AND OLEJNIKOV, D. 2007. Radio frequency identification (rfid) applied to surgical sponges. *Surg. Endosc* 21, 1235–1237.
- [Rogers 1962] ROGERS, E. M. 1962. Diffusion of innovations. The Free Press.
- [Rosenberg 1972] ROSENBERG, N. 1972. Factors affecting the diffusion of technology. *Explorations in Economic History* 10, 1, 3–33.
- [Royston 1998] ROYSTON, G. 1998. Shifting the balance of care into the 21st century. *European Journal of Operational Research* 105, 2, 267–276.
- [Royston 1999] ROYSTON, G. 1999. Trials versus modelling in appraising screening programmes. In *British Medical journal*. Vol. 318. 360–361.
- [Saaty 2004] SAATY, T. L. 2004. *Mathematical Methods of Operations Research*. Dover Publications.
- [Sacco 2011] SACCO, L. 2011. Le transistor du futur sera-t-il en molybdène. Available via <http://www.futura-sciences.com/>.
- [Sadiq 1993] SADIQ, M. 1993. A hybrid clustering algorithm for reconfiguration of dynamic order picking systems. Ph.D. thesis, University of Arkansas.
- [Sahin et al. 2008] SAHIN, E., BUZACOTT, J., AND DALLERY, Y. 2008. Analysis of a newsvendor which has errors in inventory data record. *European Journal on Operational Research* 188, 370–389.
- [Sainfort et al. 2005] SAINFORT, F., BLAKE, J., AND RARDIN, R. L. 2005. Operations Research for Health Care Delivery Systems. Tech. rep., World Technology Evaluation Center (WTEC).
- [Sánchez 2007] SÁNCHEZ, P. J. 2007. Fundamentals of simulation modeling. In *Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference*. 54–62.
- [Sandberg and Bostrom 2008] SANDBERG, A. AND BOSTROM, N. 2008. Whole brain emulation : A roadmap. Tech. rep., Future of Humanity Institute, Oxford University.
- [Sarac et al. 2010] SARAC, A., ABSI, N., AND DAUZERE-PERES, S. 2010. A literature review on the impact of rfid technologies on supply chain management. *International Journal of Production Economics* 128, 1, 77–95.

- [Saraç 2009] SARAÇ, A. 2009. Modélisation et aide à la décision pour l'introduction de technologies rfid dans une chaîne logistique. Ph.D. thesis, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne.
- [Sargent 2007] SARGENT, R. G. 2007. Verification and validation of simulation models. In *Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference*. 124–137.
- [Schmidt 2000] SCHMIDT, B. 2000. *The Modelling of Human Behavior*. Erlangen : SCS Publications.
- [Schriber and Brunner 1997] SCHRIBER, T. AND BRUNNER, D. T. 1997. Inside discrete-event simulation software : How it works and why it matters. In *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference*. 14–22.
- [Scolnik 2011] SCOLNIK, H. 2011. Operations research : In search of an identity. Available via [www.ifors.org](http://www.ifors.org).
- [Sebelius et al. 2009] SEBELIUS, K., FRIEDEN, T. R., AND SONDIK, E. J. 2009. Health, united states, 2009 : with special feature on medical technology. Tech. rep., National Center for Health Statistics.
- [Seibel 1963] SEIBEL, R. 1963. Discrimination reaction time for a 1,023-alternative task. *Journal of Experimental Psychology* 66, 215–226.
- [Seila and Brailsford 2009] SEILA, A. AND BRAILSFORD, S. 2009. Opportunities and challenges in health care modelling. In *Advancing the Frontiers of Simulation : A Festschrift in Honor of George Samuel Fishman*. Vol. 55. New York : Springer., (ISBN : 978-1-4419-0816-2), 195–230.
- [Seppanen 2000] SEPPANEN, M. 2000. Developing industrial strength simulations models using visual basic for applications. In *Proceedings of the 32nd Conference on Winter simulation, Orlando, Florida, USA*. 77–82.
- [Sermesant et al. 2005] SERMESANT, M., RHODE, K., SANCHEZ-ORTIZ, G., CAMARA, O., ANDRIANTSIMIAVONA, R., HEGDE, S., RUECKERT, D., LAMBIASE, P., BUCKNALL, C., ROSENTHAL, E., DELINGETTE, H., HILL, D., AYACHE, N., AND RAZAVI, R. 2005. Simulation of cardiac pathologies using an electromechanical biventricular model and xmr interventional imaging. *Medical Image Analysis* 9, 467–480.
- [Shih and Wang 2011] SHIH, K.-M. AND WANG, W.-K. 2011. Factors influencing HACCP implementation in taiwanese public hospital kitchens. *Food Control* 22, 3–4, 496–500.
- [Shim and Kim 2007] SHIM, S.-O. AND KIM, Y.-D. 2007. Minimizing total tardiness in an unrelated parallelmachine scheduling problem. *Journal of the Operational Research Society* 58, 3, 346–354.
- [Sitters 2001] SITTERS, R. 2001. Two NP-hardness results for preemptive minsum scheduling of unrelated parallel machines. In *Proc. 8th International IPCO Conference, Lecture Notes in Computer Science*. Springer, 396–405.
- [Société ARIASE 2007] SOCIÉTÉ ARIASE. 2007. éligibilité à au moins une offre adsl de france télécom, par communes. Available via <http://www.ariase.com>.
- [Sokol 2005] SOKOL, B. 2005. Rfid and emerging technologies market guide to healthcare. Tech. rep., Fast Track Technologies.
- [Spielman 2005] SPIELMAN, D. J. 2005. Innovation systems perspectives on developing-country agriculture : A critical review. International Service for National Agricultural Research (ISNAR) Discussion Paper 2, International Food Policy Research Institute.
- [Statistique Canada 2010] STATISTIQUE CANADA. 2010. Enquête canadienne sur les mesures de la santé. Available via <http://www.statcan.gc.ca/>.
- [Stermann 1989] STERMAN, J. D. 1989. Modeling managerial behavior : misperceptions of feedback in a dynamic decision making experiment. *Management Science* 35, 3, 321–339.
- [Stikic et al. 2009] STIKIC, M., LARLUS, D., AND SCHIELE, B. 2009. Multi-graph based semi-supervised learning for activity recognition. In *13th International Symposium on Wearable Computers (ISWC'09), September 2009, Linz, Austria*.
- [Stockman 1948] STOCKMAN, H. 1948. Communication by means of reflect power. In *Proceedings of the IRE*. 1196–1204.
- [Stratégie Logistique 2007] STRATÉGIE LOGISTIQUE. 2007. Les dépenses en informatique augmentent. In *Stratégie Logistique, Janvier 2007, Hors-Série Numérique*. Number 3. 6–6.
- [Stringfellow et al. 2009] STRINGFELLOW, M., DIERKS, M., AND LEVERSON, N. G. 2009. Healthcare industry incentive structures pressure system operators to operate in a high-risk risk state. In *Proceedings of the Systems Dynamics Conference, Albuquerque, NM, 2009. ACM Trans. on Modeling and Computer Simulation*.
- [Swedberg 2009a] SWEDBERG, C. 2009a. Implanet tracks implantables. Available via <http://www.rfidjournal.com/article/view/5184>.
- [Swedberg 2009b] SWEDBERG, C. 2009b. Rfid helps st. joseph's keep an eye on cold storage. RFID Journal - Last Access : 06.01.2009.
- [Swedberg 2010] SWEDBERG, C. 2010. Nyack hospital tracks medication compliance. Available via <http://www.rfidjournal.com/>.

- [Tako and Robinson 2010] TAKO, A. AND ROBINSON, S. 2010. Model development in discrete-event simulation and system dynamics : An empirical study of expert modellers. *European Journal of Operational Research* 207, 784–794.
- [Talon et al. 2009] TALON, A., BOISSIER, D., PEYRAS, L., AND NIANDOU, D. 2009. Analyse de risques : Identification et estimation : Démarches d'analyse de risques - méthodes qualitatives d'analyse de risques. (Module de l'Université Numérique Ingénierie et Technologie \_ Fondation unit. Available via [http://webdav-noauth.unit-c.fr/files/perso/hniandou/cyberisques2/etage\\_3\\_aurelie/co/Module\\_Etage\\_3\\_synthese\\_43.html](http://webdav-noauth.unit-c.fr/files/perso/hniandou/cyberisques2/etage_3_aurelie/co/Module_Etage_3_synthese_43.html).
- [Togt et al. 2008] TOGT, R. V. D., VAN LIESHOUT, E., HENSBOEK, R., BEINAT, E., BINNEKADE, J., AND BAKKER, P. 2008. Electromagnetic interferences from radio frequency identification including hazardous incidents in critical care medical equipment. *Journal of American Medical Association* 299, 24, 2884–2890.
- [Torres and Glynn 1995] TORRES, M. AND GLYNN, P. 1995. A set of extensions to the siman / arena simulation environment. In *Proceedings of 1995 Winter Simulation Conference, December 3-6, 1995, Arlington, VA, USA*. 285–293.
- [van de Klundert et al. 2008] VAN DE KLUNDERT, J., MULS, P., AND SCHADD, M. 2008. Optimizing sterilization logistics in hospitals. *Health Care Manage Sci* 11, 23–33.
- [van Lieshout et al. 2007] VAN LIESHOUT, M., GROSSI, L., SPINELLI, G., HELMUS, S., KOOL, L., PENNING, L., STAP, R., VEUGEN, T., VAN DER WAAIJ, B., AND BOREAN, C. 2007. Rfid technologies : Emergine issues, challenges and policy options. Tech. rep., European Commission Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies.
- [Verdel 2000] VERDEL, T. 2000. Méthodologie d'évaluation globale des risques : Applications potentielles au génie civil. In *Colloque "Risque et génie civil", Novembre 2000, Paris*. 23–38.
- [VeriChip 2006] VERICHIP. 2006. Press release : VeriChip Corporation commercially launches VeriGuard Access Control module at ASIS International in San Diego. Available via <http://www.securitymanagementbuyersguide.com>.
- [Visser 1998] VISSERS, J. 1998. Healthcare management modelling : A process perspective. *Health Care Management Science* 1, 2, 77–85.
- [Visser 2001] VISSERS, J. M. H. 2001. The Nature and Content of Health Operational Research. In *Proceedings of the 27th Meeting of the European Working Group on Operational Research Applied to Health Services (ORAHS), Vienna, Austria, July 30 - August 4, 2001*, M. S. Rauner and K. Heidenberger, Eds. Peter Lang Publishing Group, 11–36.
- [Wang et al. 2006] WANG, S.-W., CHEN, W.-H., ONG, C.-S., LIU, L., AND CHUANG, Y.-W. 2006. RFID Application in Hospitals : A Case Study on a Demonstration RFID Project in a Taiwan Hospital. *Proceedings of the 39th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'06) 00*, C, 184a–184a.
- [Wang et al. 2010] WANG, Y.-M., WANG, Y.-S., AND YANG, Y.-F. 2010. Understanding the determinants of rfid adoption in the manufacturing industry. *Technological Forecasting and Social Change* (doi : 10.1016/j.techfore.2010.03.006).
- [Wee and Sanderson 2008] WEE, A. N. AND SANDERSON, P. 2008. Are melodic medical equipment alarms easily learned ? *Technology, Computing and Simulation* 106, 2, 501–508.
- [Wessel 2007] WESSEL, R. 2007. Czech hospital using hf rfid to track chemotherapy drugs. Available via <http://www.rfidjournal.com/>.
- [Wessel 2008] WESSEL, R. 2008. Nestlé italy finds rfid brings roi for ice cream. Available via <http://www.rfidjournal.com>.
- [Winston 1993] WINSTON, W. L. 1993. *Operations Research \_ Applications and Algorithms*. International Thomson Publishing.
- [WorldHealthOrganisation 1946] WORLDHEALTHORGANISATION. 1946. Préambule à la constitution de l'organisation mondiale de la santé, tel qu'adopté par la conférence internationale sur la santé. signé le 22 juillet 1946 par les représentants de 61 Etats (Actes officiels de l'Organisation mondiale de la Santé, n. 2, p. 100) et entré en vigueur le 7 avril 1948.
- [WorldHealthOrganization 2010] WORLDHEALTHORGANIZATION. 2010. Counterfeit medicines : Fact sheet. Available via <http://www.who.int/> [accessed July 22, 2010].
- [Wright 1936] WRIGHT, T. 1936. Factors affecting the cost of airplanes. *Journal of Aeronautical Sciences* 3, 122–128.
- [Young 2007] YOUNG, H. P. 2007. Innovation diffusion in heterogeneous populations : Contagion, social influence, and social learning. Available [http://www.brookings.edu/media/files/rc/papers/2007/10\\_diffusion\\_young/10\\_diffusion\\_young.pdf](http://www.brookings.edu/media/files/rc/papers/2007/10_diffusion_young/10_diffusion_young.pdf).
- [Zhanand et al. 2008] ZHANAND, C., SMITH, S. R., KEYES, M. A., HICKS, R. W., COUSINS, D. D., AND CLANCY, C. M. 2008. How useful are voluntary medication error reports ? the case of warfarin-related medication errors. *Joint Commission Journal on Quality and Patient Safety* 34, 1, 36–45.
- [Zhong 2010] ZHONG, H. 2010. Core area territory planning for optimizing driver familiarity and route flexibility. U.S. Patent Application Publication No. : US 7,840,319 B2.







---

## **Modélisation et aide à la décision pour l'introduction de technologies communicantes en milieu hospitalier**

---

**Résumé :** Cette thèse traite de l'évaluation des apports de l'introduction de nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC), plus précisément les technologies d'IDentification par Radio-Fréquences (RFID), dans le milieu de la Santé. Un premier objectif a naturellement consisté en la description des particularités de la production de soins et de l'organisation hospitalière, ainsi que des problématiques associées à la mise en place de systèmes RFID dans un contexte plus général et une présentation des outils permettant de répondre à ces problématiques. Suivent deux cas d'application issus du projet MISTRALS (Mutualisation Informatique des Systèmes Technologiques pour le Recherche phArmaceutique et La Santé) que sont les tumorothèques (biobanques particulières) et la production de chimiothérapies. La partie "générique" des impacts des technologies mènent à la proposition d'une approche descriptive adaptée au problème. Les apports des technologies permettent d'inventorier les boîtes de cryotubes stockées à très basse température rapidement et précisément. Cette observation nous a poussés à définir et étudier des possibilités de la mise en place de l'activité de concaténation de ces boîtes. Cette activité et une approche d'optimisation la concernant sont intégrées à un outil de simulation par événements discrets. L'intérêt des objets communicants est également pluriel dans la production des chimiothérapies. Outre les apports logistiques, les RFID permettent d'acquérir des données fiables pour paramétrer les profils et niveaux de performance des ressources humaines. Nous déterminons une approche de génération d'ordonnancements intégrant la gestion des compétences et l'intégrons à une simulation à événements discrets.

---

**Mots-clefs :** RFID, Santé, Simulation à événements discrets, Aide à la décision.

---

## **Modeling and Decision-Support for the Introduction of Auto-ID Technologies in Hospitals**

---

**Abstract :** This thesis aims at evaluating the impacts of Radio-Frequency Identification (RFID) within a healthcare context. The first parts of this dissertation describe the particularities of health-production systems, the problematic of introducing RFID technologies within a general context, and present the tools that can be used to answer questions related to implementing new information and communication technologies within hospitals. Two use cases are developed. They concern tumour-banks (and more generally biobanks) and chemotherapies production systems. The generic impacts of RFID technologies led us proposing an adapted descriptive approach. Technologies allow fast and acute inventories, even concerning cryotubes containing biological samples that are stored at very low temperatures. This observation led us to define and study the possibilities for re-organizing these particular stocks. This activity and a specific optimization approach are included in a discrete-event simulation tool. Several improvements can also be raised through the use of auto-communicating devices within a chemotherapy production system. We focus on using real-time data to estimate the evolution of competency of the human resources concocting cytotoxics. We describe an optimization approach for scheduling the production of chemotherapies considering the resources performance level, and include this tool within a dedicated discrete-event simulation model.

---

**Keywords :** RFID, Healthcare, Discrete-Event Simulation, Decision-making.

---